

Resum

Al llarg d'aquest projecte s'ha desenvolupat una modelització d'un aerogenerador de velocitat variable amb aspes orientables, un generador d'inducció doblement alimentat (*DFIG*) i un sistema de convertidors *back-to-back* que permet la connexió i el control del rotor amb la xarxa.

També s'han modelitzat els diferents sistemes de control que permeten el correcte funcionament de l'aerogenerador; els sistemes de control del convertidor i el sistema de control d'alt nivell.

Referent a les simulacions, s'ha posat a prova el sistema per a diferents tipus de vent (constant, rampa, ràfega i turbulència), i finalment s'ha dut a terme una simulació per a un sot de tensió en el cantó de la xarxa. El comportament del sistema modelitzat és l'esperat d'un aerogenerador, i els resultats són correctes.

A més a més en el anàlisi econòmic i medi ambiental s'ha comprovat la viabilitat del projecte, i els seus avantatges.



Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
ÍNDIX DE FIGURES	7
ÍNDIX DE TAULES	11
1 GLOSSARI	13
Símbols.....	13
Símbols grecs.....	15
Acrònims.....	15
2 PREFACI	17
3 INTRODUCCIÓ	19
3.1 Objectius del projecte.....	19
3.2 Abast del projecte	19
4 DESCRIPCIÓ DEL ESQUEMA GENERAL I ELS SUBSISTEMES	21
5 MODELITZACIÓ DEL SISTEMA	25
5.1 Modelització del vent	25
5.1.1 Component constant.....	26
5.1.2 Component rampa	26
5.1.3 Component ràfega	27
5.1.4 Component turbulència	28
5.2 Modelització de la turbina	29
5.3 Modelització de la transmissió	31
5.4 Modelització del generador.....	31



5.4.1	Funcionament d'un generador DFIG	31
5.4.2	Modelització d'un generador DFIG	33
5.5	Modelització del convertidor	35
5.5.1	Funcionament del convertidor	35
6	MODELITZACIÓ DELS SISTEMES DE CONTROL	39
6.1	Control d'alt nivell.....	39
6.1.1	Control del angle de les aspes o control del pitch.....	39
6.1.2	Control de la potència òptima	42
6.2	Control del convertidor <i>back-to-back</i>	43
6.2.1	Control del RSC.....	44
6.2.2	Control del GSC	47
7	CONTROL DURANT UN SOT DE TENSIÓ	53
7.1	Requeriments del sistema	53
7.2	Sistema del chopper	54
7.2.1	Modelització del chopper	54
7.2.2	Modelització del sistema de control del chopper	54
7.3	Saturació dels corrents en el GSC	55
8	SIMULACIONS	57
8.1	Simulació per a un vent constant.....	59
8.2	Simulació per a un vent rampa	62
8.3	Simulació per a vent ràfega	64
8.4	Simulació amb component de turbulència.....	66
8.5	Simulació d'un sot de tensió a la xarxa.....	67
9	IMPACTE MEDIAMBIENTAL	71
9.1	Impacte mediambiental d'un parc eòlic	71
9.1.1	Fabricació	71
9.1.2	Muntatge del parc i operació.....	71
9.1.3	Desmantellament del parc	72
9.2	Impacte mediambiental del projecte teòric	72
10	ESTUDI ECONÒMIC	73



CONCLUSIONS	75
AGRAÏMENTS	77
BIBLIOGRAFIA	79
Referències bibliogràfiques	79
APÈNDIX A - TRANSFORMADA DE PARK	81



Índex de figures

Figura 4.1 Parts de la góndola. Font [8]	21
Figura 4.2 Esquema general dels components del sistema	21
Figura 4.3 Esquema de blocs del sistema	23
Figura 5.1 Direcció del vent respecta a la turbina. Font [4]	25
Figura 5.2 Component constant de la velocitat del vent	26
Figura 5.3 Component rampa de la velocitat del vent	27
Figura 5.4 Component ràfega de la velocitat del vent	28
Figura 5.5 Esquema del sistema amb valors de referència per al control del convertidor	32
Figura 5.6 Fluxos de potència en diferents modes del generador.	33
Figura 5.7 Components del convertidor	35
Figura 5.8 Exemples de senyals de control de IGBT's. Font [13]	36
Figura 5.9 Esquemes de convertidors reals	36
Figura 5.10 Model equivalent per a la banda de xarxa del convertidor	36
Figura 5.11 Sistema RSC	37
Figura 6.1 Sistemes de control de l'aerogenerador	39
Figura 6.2 Règims de treball del aerogenerador. Font[7]	40
Figura 6.3 Variació de C_p en funció de λ per a diferents angles del pitch. Font [7]	41



Figura 6.4 Modelització del sistema de càlcul del pitch	42
Figura 6.5 Modelització del sistema dels actuadors del pitch	42
Figura 6.6 Model senzill del convertidor i els seus sistemes de control	43
Figura 7.1 Sot de tensió on l'aerogenerador s'ha de mantenir connectat. Font [17]	53
Figura 7.2 Chopper	54
Figura 8.1 Velocitat constant inferior: V_w	59
Figura 8.2 Velocitat constant inferior: P_{mec} , P_{opt} , T_t i T_{opt}	60
Figura 8.3 Velocitat de rotació de la turbina ω_t	60
Figura 8.4 Velocitat constant inferior: Angle del pitch	61
Figura 8.5 Velocitat constant inferior: P_s i P_r	61
Figura 8.6 Velocitat constant inferior: Q_s i Q_r	62
Figura 8.7 Velocitat constant inferior: v_{sqd}	62
Figura 8.8 Component rampa: V_w	63
Figura 8.9 Component rampa: T_t , T_{opt}	63
Figura 8.10 Component rampa: Angle del pitch	63
Figura 8.11 Component rampa: P_s i P_r	64
Figura 8.12 Component ràfega: V_w	64
Figura 8.13 Component ràfega: P_{mec} i P_{opt}	65
Figura 8.14 Component ràfega: P_s , P_r	65
Figura 8.15 Component ràfega: v_{rqd}	66
Figura 8.16 Component turbulència: V_w	66



Figura 8.17 Component turbulència: T_t , T_{opt} , P_{mec} i P_{opt}	67
Figura 8.18 Component turbulència: P_s i P_r	67
Figura 8.19 Sot de tensió: v_{sqd}	68
Figura 8.20 Sot de tensió: v_{lqd}	68
Figura 8.21 Sot de tensió: i_{zqd}	68
Figura 8.22 Sot de tensió: E_{dc}	69
Figura 8.23 Sot de tensió: $I_{chopper}$	69
Figura A.0.1 Senyal abc i senyal de Clarke	81
Figura A.0.2 Senyal abc i senyal de Park	82



Índex de taules

Taula 5.1 Orografia del terreny	28
Taula 8.1 Paràmetres de la turbina	57
Taula 8.2 Paràmetres de la transmissió	57
Taula 8.3 Paràmetres del generador	57
Taula 8.4 Paràmetres del convertidor	58
Taula 8.5 Paràmetres del sistema de control del pitch	58
Taula 8.6 Paràmetres del sistema de control del chopper	58
Taula 10.1 Costos del material emprat	73
Taula 10.2 Costos de la mà d'obra	73
Taula 10.3 Cost total del projecte	73



1 Glossari

Símbols

V_w	Velocitat del vent
$v_c(t)$	Component constant de la velocitat del vent
$v_r(t)$	Component rampa de la velocitat del vent
V_r	Pendent de la velocitat del vent de la component rampa
t_{ir}	Temps d'inici de la rampa
t_{fr}	Temps final de la rampa
$v_f(t)$	Component ràfega de la velocitat del vent
V_f	Amplitud de la ràfega
t_{if}	Temps d'inici de la ràfega
t_{ff}	Temps final de la component ràfega
$v_t(t)$	Component de turbulència de la velocitat del vent
P_{dt}	Densitat de potència de la turbulència
h	Alçada del aerogenerador
l	Escala de turbulència
V_m	Velocitat mitjana del vent
z_o	Paràmetre de la orografia del terreny
f	Freqüència
Δf	Variació de la freqüència
P_w	Potència del vent
A	Àrea escombrada per les aspes del generador
\dot{m}	Cabal màssic
P_t	Potència de la turbina
C_p	Coeficient aerodinàmic de la turbina
J_t	Moment d'inèrcia de la turbina
N	Relació de transmissió
ω_t	Velocitat angular de la turbina
R	Radi
$C_1 \dots C_9$	Coeficients de la turbina
ω_m	Velocitat de rotació del rotor del generador
ω_r	Velocitat elèctrica del rotor
p	nombre de parells de pols del generador



f_s	Freqüència de sincronisme
ω_s	Velocitat elèctrica del estator
s	Lliscament del generador
v_s, v_r	Voltatges del estator i del rotor
i_s, i_r	Corrents del estator i del rotor
r_s, r_r	Resistència dels debanats del estator i del rotor
L_{ss}, L_{rr}	Autoinductàncies dels debanats del estator i del rotor
L_{sm}, L_{rm}	Inductàncies d'acoblament entre debanats del mateix grup
L_{ls}, L_{lr}	Inductàncies de dispersió dels debanats del estator i del rotor respectivament
L_{sr}, L_{rs}	Valors màxims que prenen les inductàncies d'acoblament entre debanats d'estator i rotor
V_z^{abc}	Tensió de la xarxa en trifàsic
V_l^{abc}	Tensió del cantó del convertidor
r_l	Resistència del convertidor a la banda de xarxa
l_l	Inductància del convertidor a la banda de xarxa
i_l^{abc}	Corrent que genera el convertidor al cantó de la xarxa
v_r^{abc}	Tensió en el rotor del generador
v_c^{abc}	Tensió en el convertidor RSC
I_{dcx}, I_{dcr}	Intensitats del bus de contínua
C	Condensador del bus de contínua
E_o	Tensió inicial del bus de contínua
I_c	Corrent que circula per el condensador
E_{dc}	Tensió del bus
V_{min}	Velocitat del vent mínima a la qual treballa el generador
V_{nom}	Velocitat del vent per la qual està dissenyat el sistema
V_{max}	Velocitat del vent màxima a la qual pot treballar el generador
s_{max}	Velocitat màxima dels actuadors del pitch
s_{min}	Velocitat mínima dels actuadors del pitch
C_{popt}	Coeficient aerodinàmic òptim
W_{topt}	Velocitat de la turbina òptima
V_{sq}, V_{sd}	Tensions en referència de Park del estator
V_{rq}, V_{rd}	Tensions en referència de Park del rotor
i_{sq}, i_{sd}	Corrents en referència de Park del estator
i_{rq}, i_{rd}	Corrents en referència de Park del rotor
Q_s, Q_r	Potència reactiva del estator i del rotor
P_s, P_r	Potència activa del estator i del rotor
E^*	Consigna del voltatge del bus de continua
I_{max}	Corrent màxima que pot suportar el sistema
E_{max}	Tensió màxima permesa en el bus de contínua
E_{min}	Tensió mínima a la qual s'activa el chopper
P_{max}	Potència màxima permesa
$R_{chopper}$	Resistència del chopper



I_{chopper} Corrent consigna del chopper

Símbols grecs

φ_i	Fase inicial de cada component aleatori
$\Delta\varphi$	Increment aleatori
β	Angle del pitch
λ	<i>Tip speed ratio</i>
Γ_t	Parell generat per la turbina
Γ_g	Parell elèctric del generador
λ_s, λ_r	Fluxos del estator i del rotor
θ_r	Angle d'orientació del eix del generador
β_{\max}	Angle màxim del pitch
β_{\min}	Angle mínim del pitch
λ_{opt}	<i>Tip speed ratio</i> òptim
Γ_{topt}	Parell òptim de la turbina
Γ_{gopt}	Parell òptim del generador
ρ	Densitat del aire

Acrònims

RSC	Convertidor del cantó del rotor (<i>Rotor side converter</i>)
GSC	Convertidor del cantó del estator (<i>Grid side converter</i>)
DFIG	Generador d'inducció doblement alimentat (<i>Double feed inducted generator</i>)



2 Prefaci

A mitjans del 2014 la capacitat mundial d'energia eòlica instal·lada generava al voltant d'un 4% del consum d'electricitat mundial. Més de 80 països utilitzen l'energia eòlica, en el cas de Dinamarca es genera més de un 25% d'electricitat a partir d'energia eòlica. Cada any augmenta la capacitat amb taxes majors del 20% com esta descrit en [1].

A Espanya es va produir un 21,1% del consum elèctric en 2013 a partir d'energia eòlica.

L'energia eòlica ha despertat l'interès de moltes companyies i governs ([2] i [3]) que preveuen que aquesta tecnologia serà la resposta a molts dels problemes de contaminació que sorgeixen d'altres fonts d'energia, ja que l'energia eòlica és un recurs renovable, net i ajuda a disminuir les emissions de gasos contaminants substituint a les fonts d'energia que utilitzen combustibles fòssils.

Tot i que l'energia eòlica suposa molts avantatges també suposa alguns inconvenients [3]. La variabilitat del vent resulta problemàtica per a la xarxa elèctrica, i l'augment de parcs eòlics connectats a la mateixa ha provocat l'enduriment de la qualitat del subministrament.

Per totes aquestes raons, cal millorar la qualitat de subministrament i son necessaris establir models que permetin la seva correcta simulació i estudi per tal de millorar el funcionament dels parcs eòlics.



3 Introducció

3.1 Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és la modelització, control i simulació d'un aerogenerador d'eix horitzontal, de pales orientables i amb generador d'inducció doblement alimentat (DFIG), el rotor del qual està connectat a la xarxa a través d'un convertidor *back-to-back*.

A partir d'aquest model es podrà simular l'aerogenerador en diverses condicions i estudiar el seu comportament. A més a més es podran avaluar els seus sistemes de control en diverses situacions.

3.2 Abast del projecte

S'ha simulat el generador per a varies condicions de vent, i finalment s'ha dut a terme una simulació per a un sot de tensió. No s'ha modelitzat el sistema del yaw, i per tant totes les simulacions s'han dut a terme dins els valors de treball del sistema.

El convertidor i la transmissió s'han simplificat i idealitzat, per tant es considera que no tenen pèrdues d'energia.



4 Descripció del esquema general i els subsistemes

L'aerogenerador conté una turbina eòlica que transmet el moviment a través d'una caixa d'engranatges o reductora a l'eix del generador elèctric d'inducció doblement alimentat.

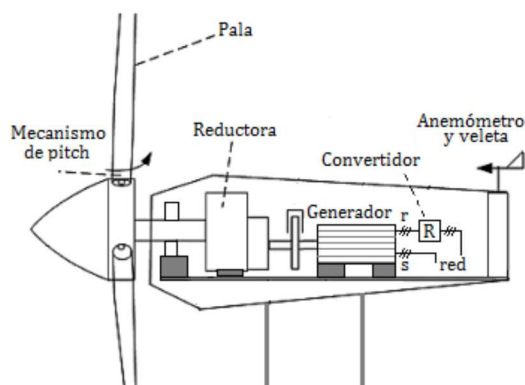


Figura 4.1 Parts de la góndola. Font [8]

Com es mostra a la figura 4.1 el generador consta d'un rotor bobinat connectat a un convertidor *back-to-back*, que a partir del seu sistema de control permet regular la potència reactiva i el parell elèctric del rotor, i el estator està directament connectat a xarxa.

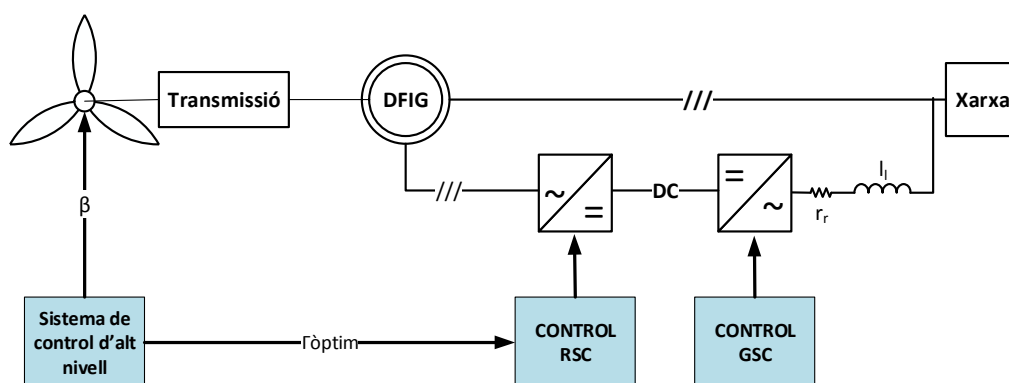


Figura 4.2 Esquema general dels components del sistema



La turbina consta de tres aspes, que son orientables a partir del sistema de control del pitch. El generador és un *DFIG* (generador doblement alimentat) amb p parells de pols. Aquest tipus de generadors poden tenir 2, 4 o 6 parells; en aquest cas s'ha assignat al generador 2 parells de pols.

El sistema del *back-to-back* permet la transmissió de potència entre sistemes asíncrons o amb diferents freqüències (com és el cas de la xarxa/estator i el rotor), i també permet estabilitzar i protegir xarxes enfront pertorbacions o falles en el sistema.

Aquest sistema consisteix en un ondulator trifàsic alimentat per un bus de contínua alimentat a la vegada per un rectificador trifàsic controlat connectat a la xarxa.

La majoria de la potència es genera a l'estator, que està connectat directament a la xarxa, i el rotor bobinat es connecta a un convertidor *voltage-source converter* (VSC) que pertany al sistema del *back-to-back*.

Controlant els corrents i voltatges del rotor es pot controlar la potència reactiva que s'entrega a la xarxa pel generador i el parell elèctric.

El sistema s'ha modelitzat per parts o subsistemes per tal de simplificar el problema:

- Modelització de la velocitat del vent que rep l'aerogenerador
- Model de la turbina que transforma la velocitat del vent en energia mecànica
- Model de la transmissió, per simplificar-ho s'utilitzarà un model d'una sola massa.
- Model del generador
- Model del convertidor *back-to-back* i de la xarxa elèctrica

A més d'aquests subsistemes, l'aerogenerador constarà dels següents sistemes de control:

- Control del GSC (*Grid side converter*)
- Control del RSC (*Rotor side converter*)
- Control d'alt nivell, que comprèn el sistema de control de potència òptima i el sistema de control del pitch



A la Figura 4.3 es mostra un esquema simplificat dels subsistemes anteriors, el back-to-back està compost per diversos sistemes i diversos controls, degut a la seva complexitat s'han esquematitzat tots aquests sistemes en un sol bloc.

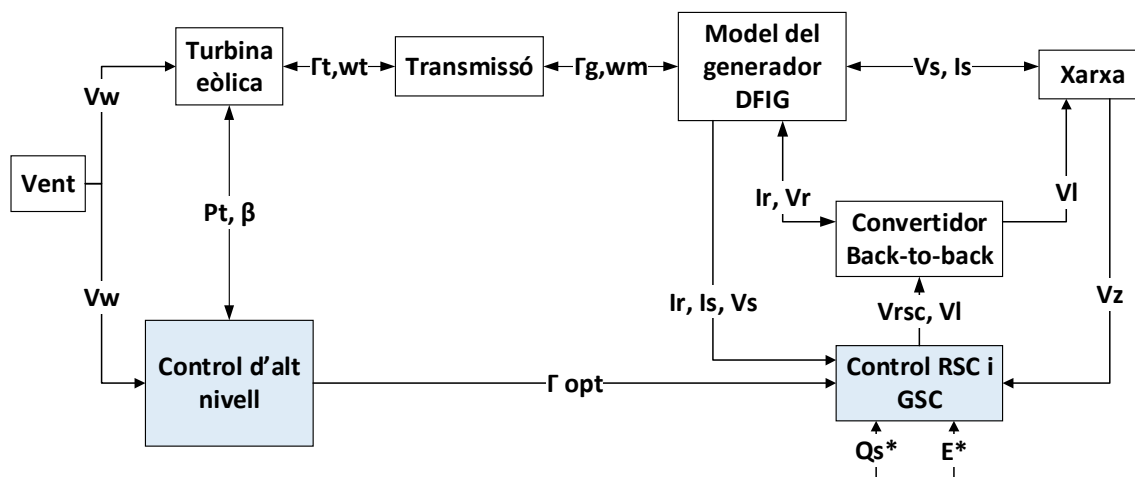


Figura 4.3 Esquema de blocs del sistema

També s'ha modelitzat un sistema de seguretat al convertidor per tal d'assegurar el correcte funcionament del aerogenerador durant un sot de tensió: Sistema del chopper (en el bus de contínua)



5 Modelització del sistema

5.1 Modelització del vent

En general el vent no és completament perpendicular a la turbina, el sistema del yaw és el que s'encarrega de girar la góndola per tal que el vent impacti sobre la turbina el més directament possible; tot i això es impossible captar el 100% del vent.

El sistema modelitzat en aquest projecte no incorpora el yaw, i el senyal de vent que s'introdueix es suposarà com la component normal a l'àrea recorreguda per les aspes. La resta de les components vectorials del vent no s'han tingut en compte.

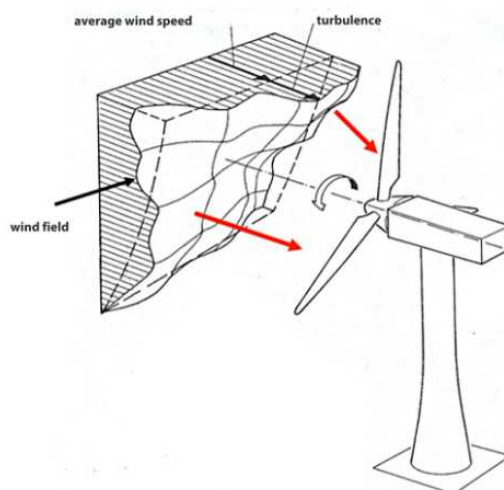


Figura 5.1 Direcció del vent respecte a la turbina. Font [4]

El vent no es constant, pateix variacions al llarg del temps i és per això que s'ha decidit dividir aquest senyal en quatre components tal com s'indica en [4]:

- Component constant $vc(t)$
- Component rampa $vr(t)$



- Component ràfega $vf(t)$
- Component turbulència $vt(t)$

La suma d'aquestes quatre components produirà el senyal de vent que s'introduirà a la màquina:

$$V_w(t) = vc(t) + vr(t) + vf(t) + vt(t) \quad (5.1)$$

5.1.1 Component constant

És el valor inicial del vent i estarà modelitzat com una constant.

$$vc(t) = K \quad (5.2)$$

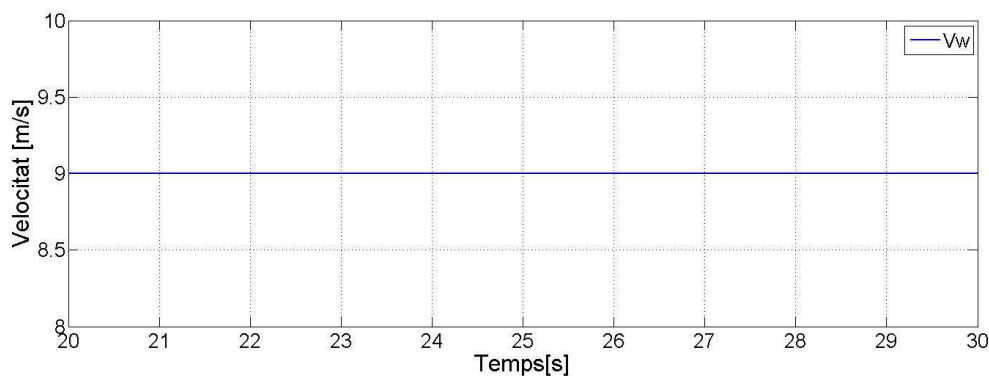


Figura 5.2 Component constant de la velocitat del vent

5.1.2 Component rampa

La component rampa s'utilitza per simular l'increment de velocitat del vent al llarg del temps. S'ha idealitzat suposant que aquest increment es constant durant un interval de temps.

$$vr(t) = \Delta v = \begin{cases} 0 & \text{per } t \leq tir \\ Vr \frac{(t-tir)}{(tfr-tir)} & \text{per } tir \leq t \leq tfr \\ Vr & \text{per } tfr \leq t \end{cases} \quad (5.3)$$

On:

- tir temps on s'inicia la rampa
- tfr temps on finalitza la rampa
- Vr pendent de la rampa



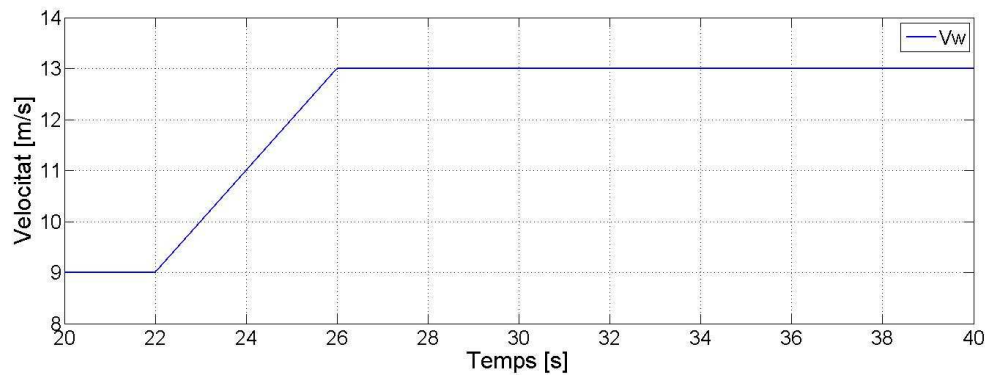


Figura 5.3 Component rampa de la velocitat del vent

5.1.3 Component ràfega

La component ràfega és una ona sinusoidal que dura un període d'oscil·lació.

$$vf(t) = \begin{cases} 0 & \text{per } t \leq tif \\ Vf \left(1 - \cos \left[2\pi \left(\frac{t-tif}{tff-tif} \right) \right] \right) & \text{per } tif \leq t \leq tff \\ 0 & \text{per } tff \leq t \end{cases} \quad (5.4)$$

On:

tif temps d'inici de la component ràfega

tff temps final de la component ràfega

Vf Amplitud de la component ràfega



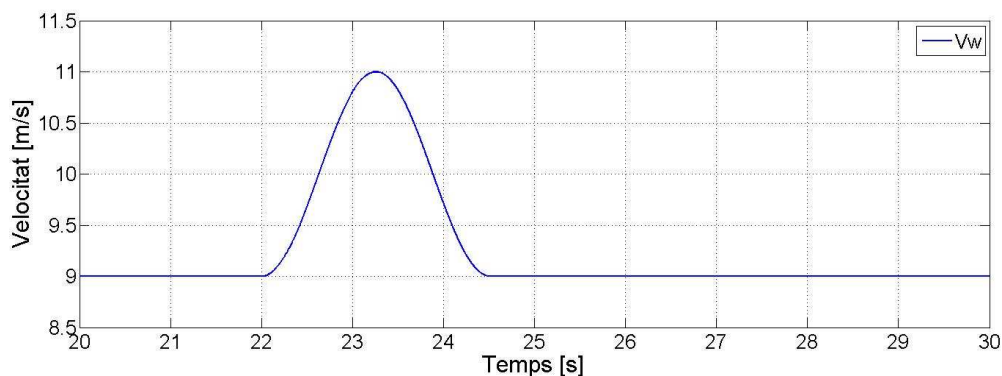


Figura 5.4 Component ràfega de la velocitat del vent

En el cas ideal, s'utilitzarien dades pressos sobre el terreny, però com que això no ha estat possible, s'ha utilitzat el mètode explicat en [4-6] per tal de produir aquest senyal. La intensitat de la turbulència es pot calcular de la següent manera:

$$P_{dt}(f) = l \cdot V_m \left(\frac{1}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \right) \left(1 + 1,5 \frac{f l}{V_m} \right)^{-5/3} \quad (5.5)$$

On:

- P_{dt} és la densitat de potència de la turbulència per a una freqüència determinada (W/Hz)
 h és l'alçada del aerogenerador (m)
 l és una escala de turbulència que val 20h quan $h < 30$ m i 600 quan $h > 30$ (m)
 V_m és la velocitat mitjana del vent (m/s)
 z_0 és un paràmetre que depèn de la orografia del terreny on està situat el aerogenerador.

Aquest paràmetre es troba a la següent taula:

Orografia	Interval per z_0 (m)
Mar obert/sorra	0,0001-0,001
Neu	0,001-0,005
Gespa curta	0,001-0,01
Gespa llarga/terra rociosa	0,04-0,1
Boscós o ciutats	1-5

Taula 5.1 Orografia del terreny

Aleshores la component del vent de turbulència es pot calcular amb l'equació 5.6:

$$v_t(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{dt} \cdot \Delta f} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_i + \Delta\varphi) \quad (5.6)$$



On:

f és la freqüència

Δf és fixa a 0.1Hz, que és la freqüència amb major densitat de potència

φ_i és la fase inicial de cada component aleatori de la fase en cada instant de temps per evitar la periodicitat de la turbulència

$\Delta\varphi$ és un petit increment aleatori de la fase en cada instant de temps per evitar la periodicitat de la turbulència

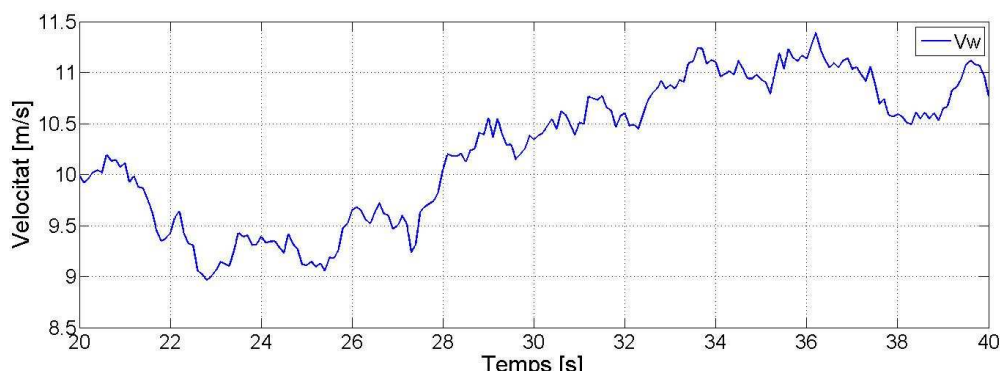


Figura 5.5 Component turbulència de la velocitat del vent

5.2 Modelització de la turbina

La turbina aprofita l'energia del vent i n'absorbeix una part. La següent expressió defineix la potència del vent que passa a través de les pales.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V_w^2 \quad (5.7)$$

On:

A és l'àrea escombrada per les aspes del aerogenerador

ρ és la densitat de l'aire

V_w és la velocitat del vent

\dot{m} és el cabal màssic



La densitat del vent varia d'acord amb la temperatura, pressió atmosfèrica... és a dir amb les circumstàncies meteorològiques del moment, però per simplificar el problema ja que les variacions són menyspreables s'ha decidit tractar la densitat com una constant. D'aquesta manera la potència depèn únicament de la velocitat del vent.

La potència mecànica que la turbina extreu es defineix d'acord amb [4,7-10], de la següent manera:

$$P_t = P_w \cdot C_p \quad (5.8)$$

On:

P_t és la potència mecànica extreta del vent per la turbina

P_w és la potència del vent

C_p és una constant aerodinàmica adimensional

La constant aerodinàmica té un límit físic (límit de Betz), el qual mai s'arribarà a assolir a la realitat; és a dir, que sempre serà inferior a C_{pmax} .

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (5.9)$$

Per tant mai es podrà extreure més d'un 59,26% de la potencia del vent.

C_p també es pot expressar a partir de les formules 5.10-12:

$$C_p(\beta, \lambda) = c_1(c_2 \cdot \lambda - c_3 \cdot \beta - c_4 \cdot \beta^{c_5} - c_6)e^{-c_7 \cdot \lambda} \quad (5.10)$$

$$\lambda = \frac{1}{\lambda + c_8 \cdot \beta} - \frac{c_9}{1 + \beta} \quad (5.11)$$

$$\lambda = \frac{w_t \cdot R}{v_w} \quad (5.12)$$

On:

β és l'angle del pitch

λ és el "tip speed ratio"

$c_1 \dots c_9$ son coeficients que depenen de la geometria de les aspes

R és el radi de les aspes

w_t és la velocitat de rotació de les aspes

S'han assignat els valors indicats en [4] als coeficients c_1 a c_9 .



5.3 Modelització de la transmissió

La transmissió comprèn l'eix de la turbina, la caixa reductora i l'eix del generador; en general quan la relació de transmissió és gran, com en aquest cas, s'utilitzen engranatges de tipus planetari els quals donen una bona solució en quant a relació cost-relació de la transmissió. Per tal de simplificar el problema s'ha modelitzat com un model d'una sola massa, essent aquest model el més simple, i que no té en compte les pèrdues mecàniques del sistema. Les equacions s'han extret de [8] :

$$\Gamma_t + N \cdot \Gamma_g = J_t \cdot \frac{d}{dt} w_t \quad (5.13)$$

$$N \cdot w_t = w_m \quad (5.14)$$

On:

Γ_t	parell de la turbina eòlica
Γ_g	parell del generador
w_t	velocitat angular de la turbina
w_m	velocitat angular del rotor del generador
J_t	inèrcia de la turbina
N	relació de transmissió

La inèrcia de la turbina es molt més gran que la del generador; es per això que s'ha menyspreat aquesta segona, i pres la de la turbina com a inèrcia total.

5.4 Modelització del generador

5.4.1 Funcionament d'un generador DFIG

En aquest projecte s'ha modelitzat un generador doblement alimentat (*DFIG: Double feed inducted generator*), que és un generador d'inducció de rotor bobinat. Aquest generador consta de dos debanats trifàsics, un al estator i un altre al rotor.



El generador consta de p parells de pols. Com s'exposa en [11-13] el rotor es connecta a la xarxa a través del convertidor i el estator directament a la xarxa. Quan la màquina produeix energia, només una part minoritària de l'energia (30% aproximadament) generada flueix a través del rotor cap a la xarxa, la resta ho fa a través de l'estator.

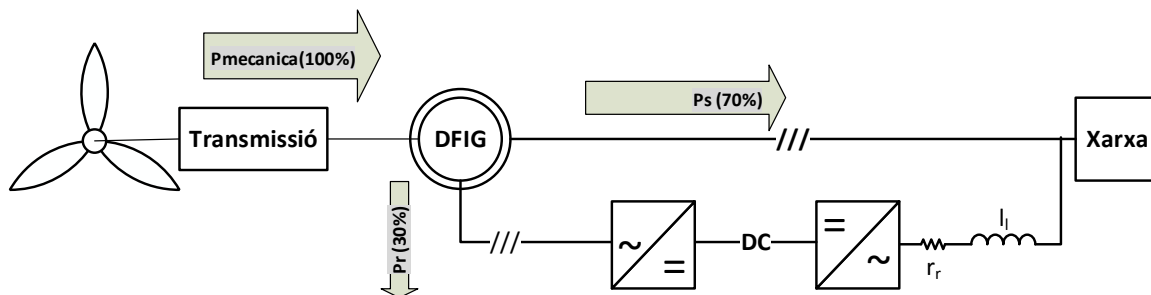


Figura 5.5 Esquema del sistema amb valors de referència per al control del convertidor

El debanat del rotor s'alimenta amb tres corrents (trifàsiques), que provocaran un camp magnètic; que dependrà de la magnitud d'aquests corrents. El camp magnètic del rotor interactua amb el del estator creant un parell, la magnitud del parell dependrà de la força dels dos camps electromagnètics i la velocitat angular del eix.

El estator en canvi està directament connectat a la xarxa, que imposa la freqüència de sincronisme f_s .

$$\omega_s = 2\pi \cdot f_s \quad (5.15)$$

ω_m es la velocitat de rotació mecànica del eix; i ω_r és la velocitat elèctrica del rotor.

$$\omega_r = p \cdot \omega_m \quad (5.16)$$

Es defineix el lliscament com:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (5.17)$$

Aleshores podem dir que:

$s < 0$ treballa en regim supersincron, i passarà potència a través del rotor cap a la xarxa

$s > 0$ treballa en regim subsincron, i el rotor consumirà energia de la xarxa.



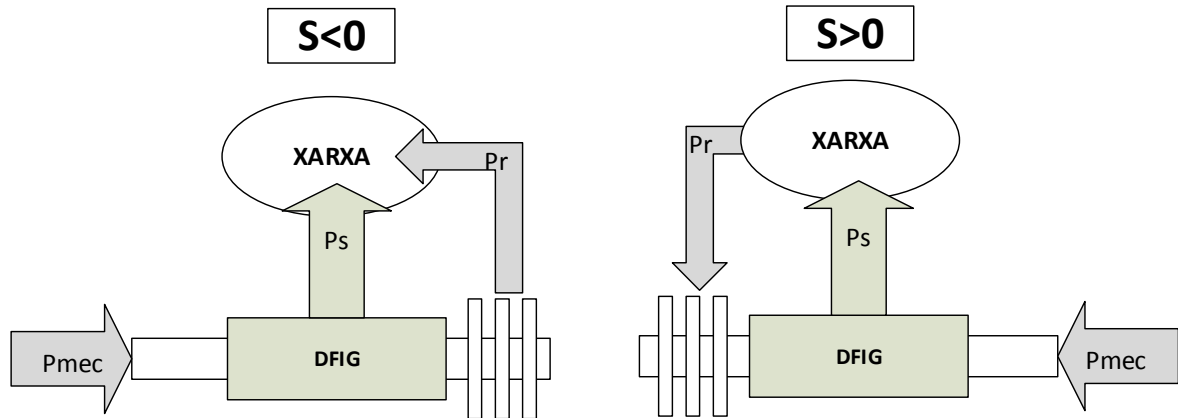


Figura 5.6 Fluxos de potència en diferents modes del generador.

5.4.2 Modelització d'un generador DFIG

Aquestes són les equacions que descriuen el comportament dinàmic d'un motor d'inducció:

$$\begin{Bmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^{abc} & 0 \\ 0 & r_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (5.18)$$

Els fluxos venen definits per:

$$\begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (5.19)$$

On:

$\lambda_r^{abc}, \lambda_s^{abc}$ son els fluxos del rotor i del estator respectivament

Les matrius utilitzades en les equacions 5.17 i 5.18 es mostren a continuació:

$$[r_s^{abc}] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$[r_r^{abc}] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (5.21)$$



$$[L_{ss}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$[L_{rr}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$[L_{sr}^{abc}] = [L_{sr}^{abc}]^{-1} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

On:

θ_r és l'angle d'orientació del eix del generador

r_s i r_r son les resistències dels debanats del rotor i l'estator

L_{ss} i L_{rr} son les autoinductàncies dels debanats del estator i del rotor respectivament

L_{sm} i L_{rm} son les inductàncies d'acoblament entre els debanats d'un mateix grup

L_{ls} i L_{lr} son les inductàncies de dispersió dels debanats del estator i del rotor respectivament

L_{sr} i L_{rs} son els valors màxims que prenen les inductàncies d'acoblament entre debanats de l'estator i del rotor

Aplicant la transformada de Park que apareix en el Apèndix A, aquestes equacions queden de la següent manera:

$$\begin{Bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \\ v_{rq} \\ v_{rd} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & L_s w_s & 0 & M w_s \\ -L_s w_s & r_s & -M w_s & 0 \\ 0 & M w_b & r_r & L_r w_b \\ -M w_b & 0 & -L_r w_b & r_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{Bmatrix} \quad (5.25)$$

Tenint en compte que:

$$w_s \cdot s = (w_s - w_r) = w_b \quad (5.26)$$

$$L_s = L_{ss} - L_{sm} + L_{ls} \quad (5.27)$$

$$L_r = L_{rr} - L_{rm} + L_{lr} \quad (5.28)$$

$$M = \frac{3}{2} L_{sr} \quad (5.29)$$



5.5 Modelització del convertidor

5.5.1 Funcionament del convertidor

El sistema modelitzat consta de dos convertidors, el RSC (*Rotor-side converter*) que es connecta a la banda del rotor i el GSC (*Grid-side converter*) que és el convertidor del cantó de la xarxa. Aquests dos convertidors estan units per el bus de continua amb un condensador en paral·lel. El seu funcionament està explicat en [14].

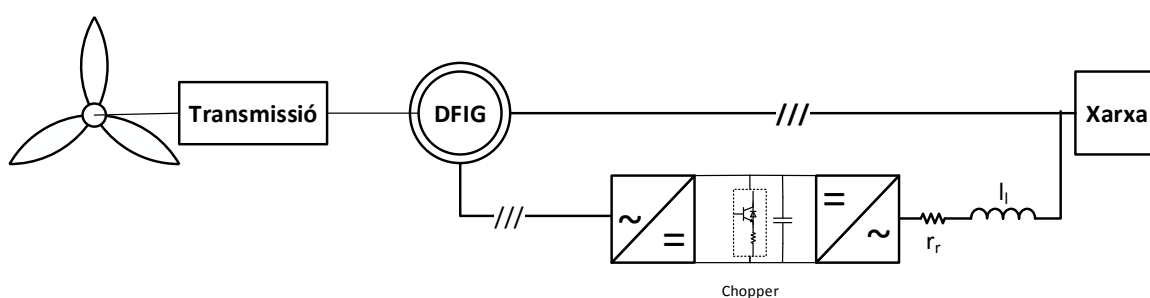


Figura 5.7 Components del convertidor

El chopper que apareix a la figura 5.7 protegeix els convertidors en cas d'un sot de tensió i s'explica més endavant a l'apartat 7.

Els convertidors a la realitat estan compostos per un sistema de IGBT's que regulats a partir de polsos PWM converteixen el voltatge i la corrent d'alterna a continua i a la inversa. Aquest sistema es molt útil ja que permet adaptar la tensió del cantó del rotor segons el parell i la potència requerida. En altres aplicacions també s'utilitzen per a canviar la freqüència de la xarxa o la fase.



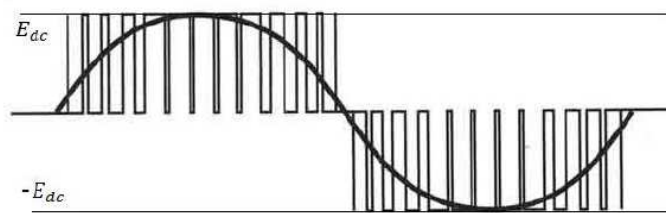


Figura 5.8 Exemples de senyals de control de IGBT's. Font [13]

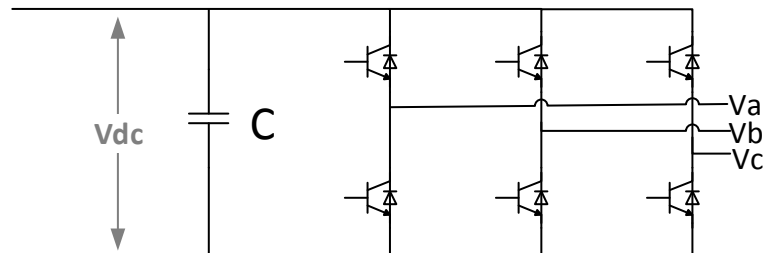


Figura 5.9 Esquemes de convertidors reals

Al llarg d'aquest projecte els convertidors no s'han modelitzat com a la realitat ja que es complicat modelitzar el senyal PWM, i s'ha modelitzat de manera que les commutacions actuen com si fossin ideals i no hi haguessin pèrdues.

5.5.1.1 Circuit de la banda de xarxa

A la figura 5.10 es pot veure la modelització del esquema utilitzat per la xarxa. V_z equivaldria als voltatges de la xarxa, i V_l als que provenen del convertidor.

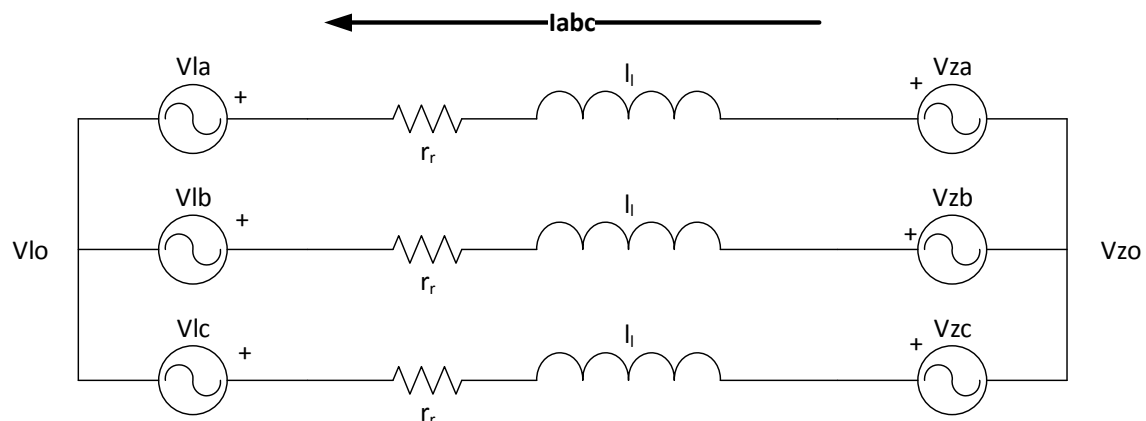


Figura 5.10 Model equivalent per a la banda de xarxa del convertidor



Aquest sistema ve definit per la següent equació:

$$v_z^{abc} - v_l^{abc} = r_l \cdot i_l^{abc} + L_l \cdot \frac{d}{dt} i_l^{abc} \quad (5.30)$$

On:

v_z^{abc} és la tensió de la xarxa que serà igual que V_s

v_l^{abc} és la tensió del cantó del convertidor

r_l és la resistència del convertidor a la banda de xarxa

L_l és la inductància del convertidor a la banda de xarxa

i_l^{abc} és la corrent que genera el convertidor al cantó de la xarxa

On les intensitats són les mesures en sentit positiu de la xarxa cap al convertidor. Les fonts de voltatge V estan controlades per el sistema de control del GSC.

5.5.1.2 Circuit de la banda del rotor

S'ha modelitzat de manera semblant al circuit de la banda de xarxa, connectant a un extrem el rotor del generador.

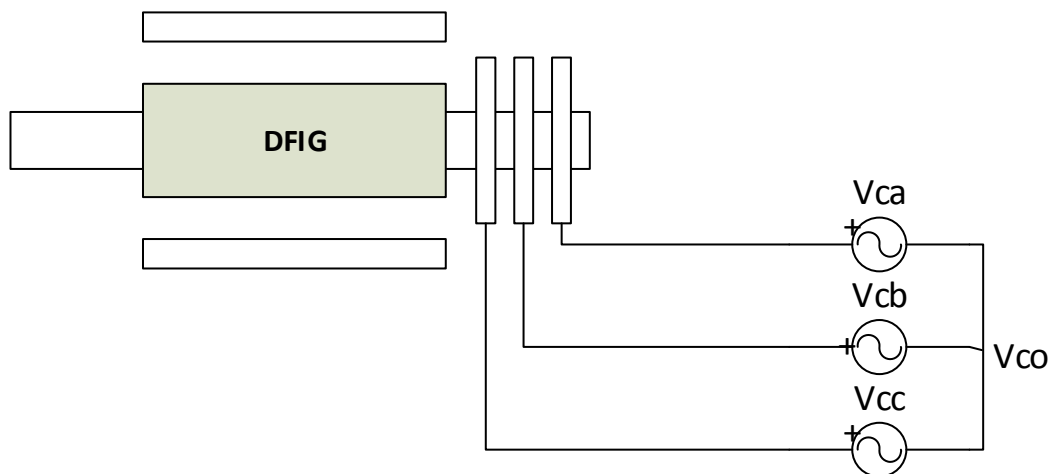


Figura 5.11 Sistema RSC



Per tant el voltatge del convertidor (RSC) serà el mateix que el dels debanats del rotor:

$$v_r^{abc} = v_c^{abc} \quad (5.31)$$

On:

v_r^{abc} és el voltatge que s'introdueix en el rotor

v_c^{abc} és el voltatge que genera el convertidor a la banda del RSC

5.5.1.3 Bus de contínua

Per modelitzar el bus de contínua s'ha substituït els dos convertidors per fonts de corrent controlades, I_{dcr} per el convertidor de la banda del rotor; i I_{dcx} per al convertidor de la banda de xarxa.

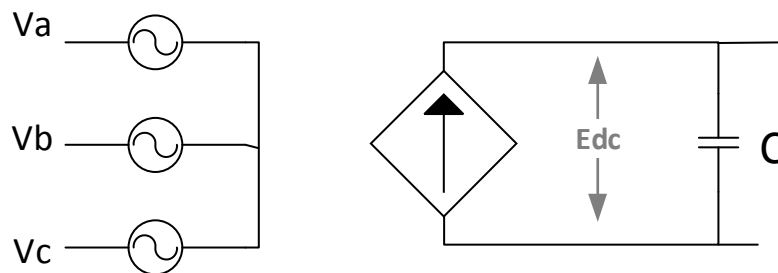


Figura 5.13 Model emprat per al bus de contínua

Les fonts de corrent estan controlades per els sistemes de control, per tal de mantenir el voltatge desitjat. Aquest circuit ve donat per la següent expressió:

$$E_{dc} = E_o + \frac{1}{C} \int_0^t I_c = E_o + \frac{1}{C} \int_0^t (I_{dcx} - I_{dcr}) dt \quad (5.32)$$

On:

E_o es la tensió inicial del condensador

C es la capacitat del condensador

I_c es la intensitat que circula cap al condensador

I_{dcx} la intensitat que prové del convertidor de xarxa

I_{dcr} la intensitat que prové del convertidor del rotor

E_{dc} és la tensió del bus de continua



6 Modelització dels sistemes de control

El generador s'ha modelitzat a partir de la transformada de Park, i per tant els sistemes de control també s'han modelitzat per a treballar en aquesta referència.

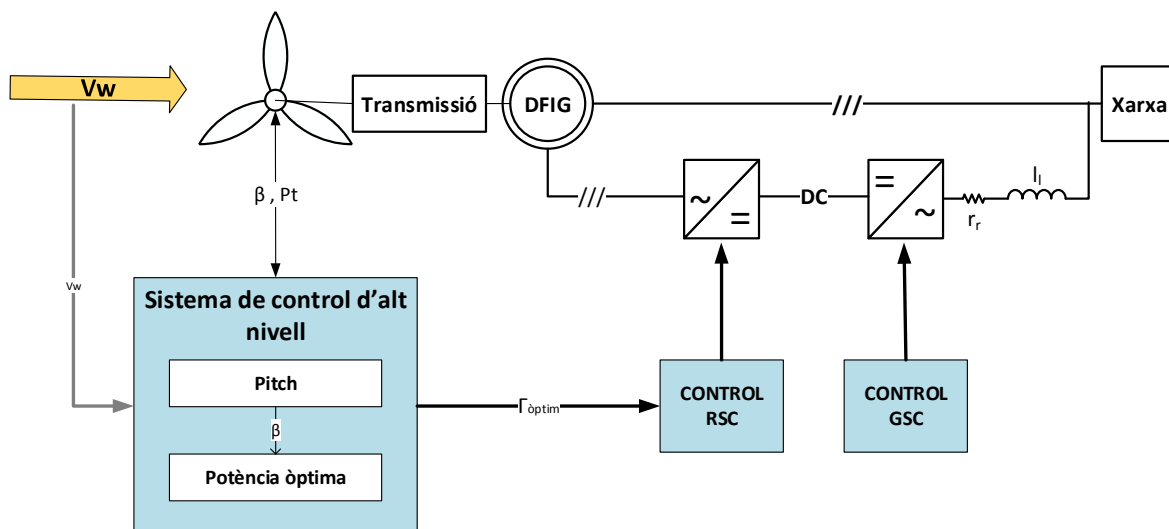


Figura 6.1 Sistemes de control de l'aerogenerador

6.1 Control d'alt nivell

El control d'alt nivell té dos sistemes; el control del pitch que varia l'angle de les aspes per controlar la potència i el control de potència òptima que calcula el parell òptim consigna del control del rotor per aconseguir la màxima potència.

6.1.1 Control del angle de les aspes o control del pitch

El control del pitch consisteix en anar variant l'angle de les pales respecte a la normal del vent per tal de controlar la potència que es genera.



S'ha utilitzat les fonts [1, 2, 15] per desenvolupar les equacions i el funcionament d'aquest sistema.

A velocitats massa baixes (menys de 5m/s aproximadament) o massa altes (per sobre de 24m/s) actua el yaw, un sistema de control que fa girar la gòndola i la posiciona de manera que la incidència del vent sobre la turbina es quasi nul·la i s'interromp la generació.

Si la velocitat del vent es situa entre aquests dos llindars (v_{min} i v_{max}) el yaw no actua i el generador funciona enviant potència cap a la xarxa. A continuació es comenten els diferents règims de funcionament depenent de la velocitat del vent:

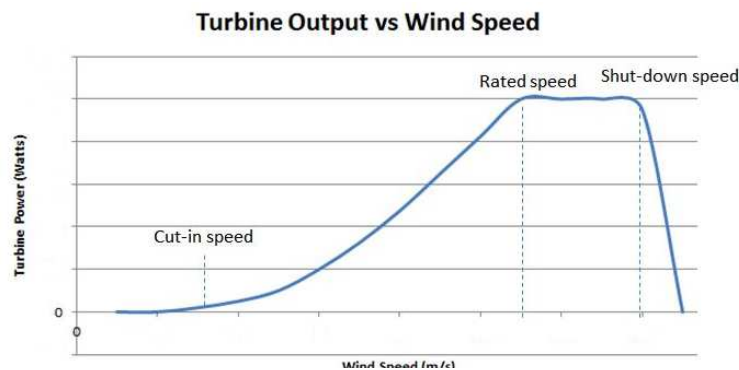


Figura 6.2 Règims de treball del aerogenerador. Font[7]

- $V_{min} \leq V \leq V_{nom}$: (Càrrega parcial) Mentre la velocitat es manté per sota de la velocitat nominal o a la velocitat nominal, l'angle del pitch es manté a 0 i la potència va augmentant amb la velocitat.
- $V_{nom} < V \leq V_{max}$: (Plena càrrega) Durant aquest període de velocitats el pitch actua per tal de mantenir la potència per sota de un valor màxim. És a dir que es produeix la potència nominal però es disminueix la C_p i λ de manera que baixa el rendiment de la turbina; ja que el vent no incideix de manera tant directa.



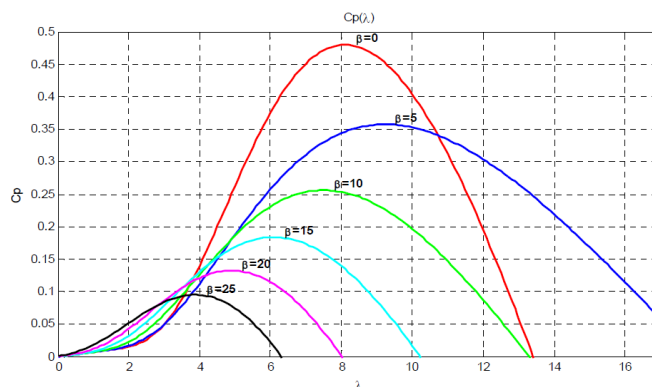


Figura 6.3 Variació de C_p en funció de λ per a diferents angles del pitch. Font [7]

En aquest projecte s'ha pres com a variable de control del pitch la potència, ja que en realitat mesurar el vent des de la gòndola no és del tot fiable a causa de les pertorbacions creades per la pròpia turbina. També es podria haver limitat en comptes de la potència la velocitat de rotació angular de la màquina seguint el mateix esquema.

Per fer aquest sistema s'ha utilitzat un sistema PI amb un sistema *anti-windup* per tal de evitar que l'integrador tingui en compte la saturació, de manera que quan el senyal es satura la constant del integrador es redueix. La potència màxima que s'ha permès al sistema ha estat la nominal. La saturació o valors líndars que pot prendre l'angle s'ha fixat entre 0 i 30° tot i que en alguns aerogeneradors l'angle del pitch pot prendre valors negatius molt propers a 0 (no més d'un o dos graus).



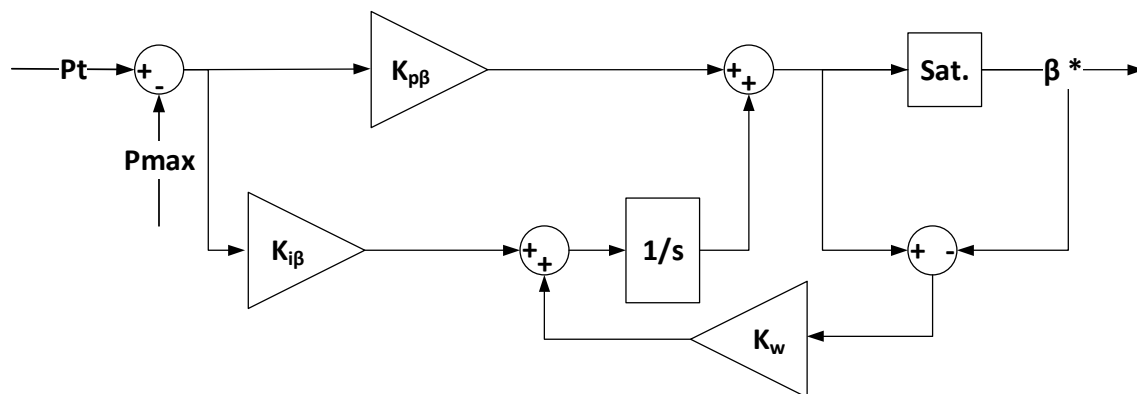


Figura 6.4 Modelització del sistema de càlcul del pitch

Cal tenir en compte que el control del pitch no es immediat, sinó que els actuadors triguen uns segons en actuar i posicionar les pales en l'angle correcte, per això s'ha afegit el següent sistema que equivaldria als actuadors. La saturació s'ha fixat en $-8^\circ/\text{s}$ i $8^\circ/\text{s}$, que és aproximadament la velocitat que poden arribar a assolir aquets mecanismes.

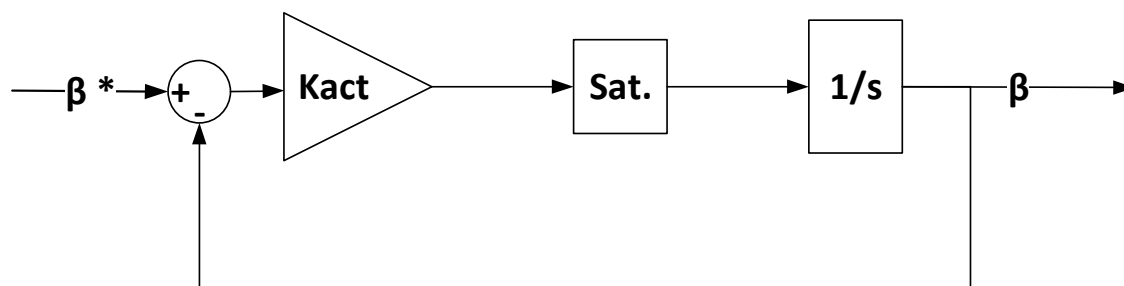


Figura 6.5 Modelització del sistema dels actuadors del pitch

6.1.2 Control de la potència òptima

A partir del control del RSC, al generador se li imposa un parell òptim, per tal d'optimitzar la potència que produeix el conjunt de la turbina i l'aerogenerador i que a més a més també determinarà a quina velocitat de rotació treballen la turbina i el generador. Aquest parell òptim ve definit per el control de la potència òptima especificat en les fonts [2] i [16].

Aquest sistema de control consisteix en mantenir el "*tip speed ratio*" constant per a un angle del pitch determinat. Es deriva el terme C_p respecte al "*tip speed ratio*" i s'igual a 0 per aïllar la λ que fa que la C_p sigui màxima.



$$\lambda_{opt}(\beta) = \frac{c_2}{\frac{c_2 + c_9 \cdot c_2}{c_7 + 1 + \beta^3} + c_3 \cdot \beta + c_4 \cdot \beta^{c_5} + c_6} - c_8 \cdot \beta \quad (6.1)$$

$$Cp_{opt}(\beta) = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_7} e^{-\frac{c_2 + c_3 \cdot c_7 \cdot \beta + c_4 \cdot c_7 \cdot \beta^{c_5} + c_6 \cdot c_7}{c_2}} \quad (6.2)$$

La velocitat del vent no es pot controlar, ve donada per condicions externes al nostre sistema, i per tant s'utilitzarà la w_t calculada per el sistema de transmissió.

$$\Gamma_{top} = \frac{Cp_{opt}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R^3 \cdot w_t^2 \quad (6.3)$$

Aquest parell òptim, és el parell referent a la turbina tenint en compte la relació de transmissió es pot calcular el parell òptim que s'ha d'imposar al control del generador (RSC).

$$\frac{\Gamma_{top}}{N} = \Gamma_{gopt} \quad (6.4)$$

6.2 Control del convertidor *back-to-back*

El control del convertidor consta de diversos sistemes, el control del RSC i el control del GSC que permeten un correcte funcionament del sistema, com es pot comprovar en el [11].

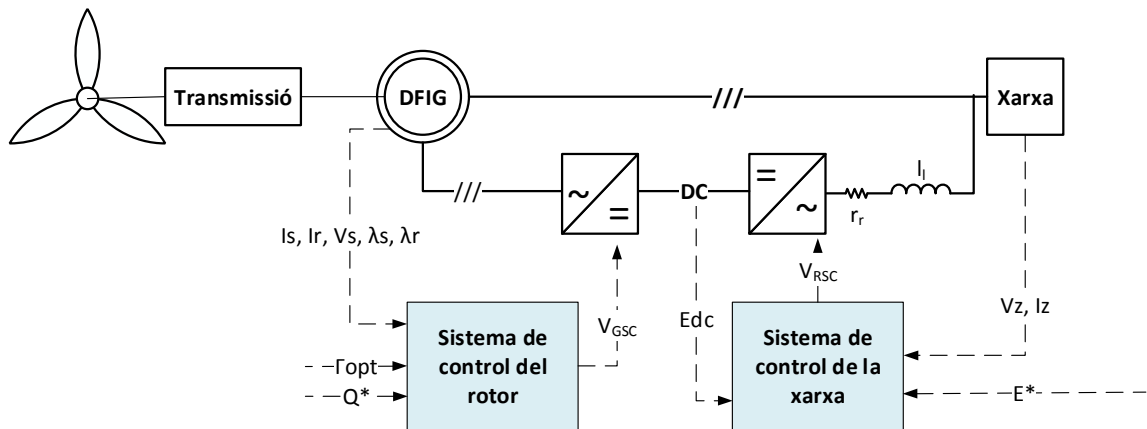


Figura 6.6 Model senzill del convertidor i els seus sistemes de control



6.2.1 Control del RSC

El RSC controla independentment la potència activa i reactiva del generador [11].

A partir de la component de l'eix directe de la component del rotor (i_{dr}) permet controlar la potència reactiva que el generador envia per l'estator a la xarxa.

A partir de la component de eix en quadratura de la corrent del rotor (i_{qr}) permet el control del parell electromagnètic amb la finalitat d'aconseguir el parell òptim com ja s'ha comentat en l'apartat anterior.

Les consignes que s'introdueixen en aquest sistema són el parell desitjat per el control d'alt nivell i la component de potència reactiva que permetran trobar les consignes de corrent desitjades.

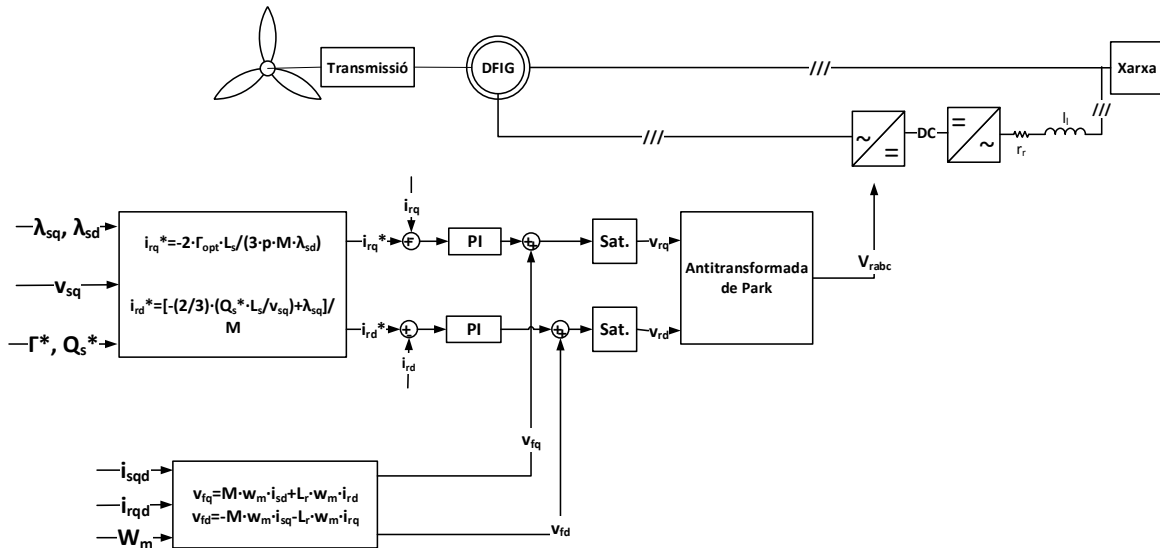


Figura 6.7 Modelització del sistema de control del rotor

6.2.1.1 Disseny delsllaços de corrent

S'ha partit de les equacions de la màquina en referència de Park obtingudes en l'apartat 5.4:

$$\begin{Bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \\ v_{rq} \\ v_{rd} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s & L_s w_s & 0 & M w_s \\ -L_s w_s & r_s & -M w_s & 0 \\ 0 & M w_b & r_r & L_r w_b \\ -M w_b & 0 & -L_r w_b & r_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{Bmatrix} \quad (6.5)$$



Desenvolupant les equacions del voltatge del rotor s'obtenen les següents equacions:

$$\begin{cases} v_{rq} = r_r \cdot i_{rq} + L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rq} + M \cdot \frac{d}{dt} i_{sq} + M \cdot w_m \cdot i_{sd} + L_r \cdot w_m \cdot i_{rd} \\ v_{rd} = r_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rd} + M \cdot \frac{d}{dt} i_{sd} - M \cdot w_m \cdot i_{sq} - L_r \cdot w_m \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (6.6)$$

S'ha considerat que la derivada dels corrents de l'estator en les equacions 6.7 es prou petita com per menysprear-la i per tant les equacions emprades es poden reescriure com:

$$\begin{cases} v_{rq} = r_r \cdot i_{rq} + L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rq} + M \cdot w_m \cdot i_{sd} + L_r \cdot w_m \cdot i_{rd} \\ v_{rd} = r_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rd} - M \cdot w_m \cdot i_{sq} - L_r \cdot w_m \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (6.7)$$

Per eliminar la dependència de w_m , es fa servir una realimentació d'estat, de manera que les equacions queden com:

$$\begin{cases} v_{rq} = \hat{v}_{rq} + M \cdot w_m \cdot i_{sd} + L_r \cdot w_m \cdot i_{rd} \\ v_{rd} = \hat{v}_{rd} - M \cdot w_m \cdot i_{sq} - L_r \cdot w_m \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (6.8)$$

$$\begin{cases} \hat{v}_{rq} = r_r \cdot i_{rq} + L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rq} \\ \hat{v}_{rd} = r_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rd} \end{cases} \quad (6.9)$$

Si es transformen les equacions 6.10 a Laplace s'obté:

$$\hat{v}_r(s) = (r_r + L_r \cdot s) i_r(s) \quad (6.10)$$

$$i_r(s) = \frac{1}{(r_r + L_r s)} \hat{v}_r(s) \quad (6.11)$$

$$G(s) = \frac{1}{(r_r + L_r s)} \quad (6.12)$$

El sistema modelitzat es el mostrat a la figura 6.8:



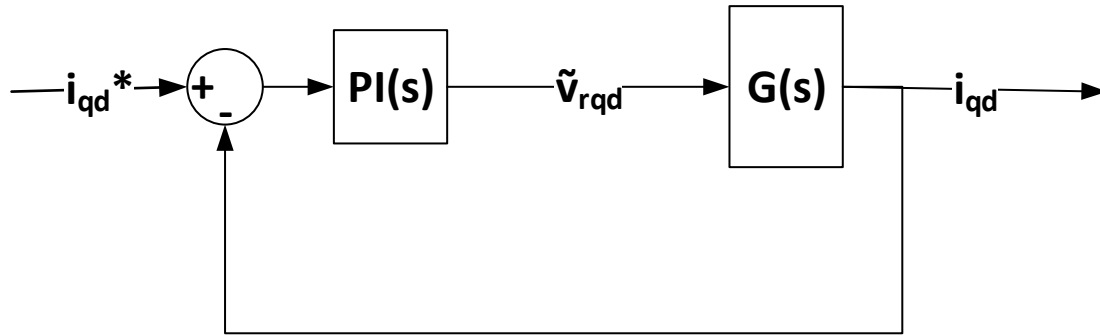


Figura 6.8 Estructura de control emprada

Les consignes de intensitat (i_{qd}^*) desitjades, i obtingudes de les consignes de parell i potència reactiva s'introdueixen per calcular l'error amb les dades obtingudes de la planta $G(s)$. Aleshores es fa passar el error per un PI ja que es vol un error nul en l'estat estacionari a partir del qual s'obindrà la consigna de tensió. Els paràmetres del controlador PI utilitzats són els següents:

$$K_{pr} = L_r * \alpha \quad (6.13)$$

$$K_{ir} = r_r * \alpha \quad (6.14)$$

On α es una constant de temps.

En el sistema modelitzat, un cop obtinguda \hat{v}_r , es procedeix a sumar els termes que falten per calcular el voltatge v_r que es demana al convertidor i que s'introduirà en el debanat del rotor del generador. La planta serà la pròpia modelització del generador.

6.2.1.2 Càlcul de les intensitats

Les consignes d'intensitat del rotor s'han calculat a partir del parell òptim determinat en el control de potència òptima i la consigna de la potencia reactiva, tenint en compte el valor de la resta de variables en cada moment.

Les equacions en referencia de Park del parell del motor i de la potència reactiva del estator son:

$$\Gamma_g = \frac{3}{2} p M (i_{sq} \cdot i_{rd} + i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (6.15)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq}) \quad (6.16)$$



Aleshores es substitueix els corrents del estator per les expressions següents:

$$i_{sq} = \frac{1}{L_s} \lambda_{sq} - \frac{M}{L_s} i_{rq} \quad (6.17)$$

$$i_{sd} = \frac{1}{L_s} \lambda_{sd} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \quad (6.18)$$

λ_{sq} i v_{sd} com es diu a [10] son 0 o molt propers a aquest valor, i per tant menyspreables, tenint això en compte s'han aïllat els corrents del rotor:

$$i_{rq}^* = \frac{-2 \cdot L_s \cdot \Gamma_m^*}{3 \cdot p \cdot M \cdot \lambda_{sd}} \quad (6.19)$$

$$i_{rd}^* = \frac{\frac{-2}{3} L_s \frac{Q_s^*}{v_{sq}} + \lambda_{sq}}{M} \quad (6.20)$$

Aquests son els corrents que han de passar per el rotor per tal d'aconseguir el parell i la potencia reactiva desitjada en cada moment.

6.2.2 Control del GSC

Com ja s'ha esmentat anteriorment el GSC és el convertidor connectat al cantó de la xarxa [14]. Aquest és el convertidor que manté el voltatge DC en un valor predefinit independentment de la magnitud i direcció de la potència del rotor.



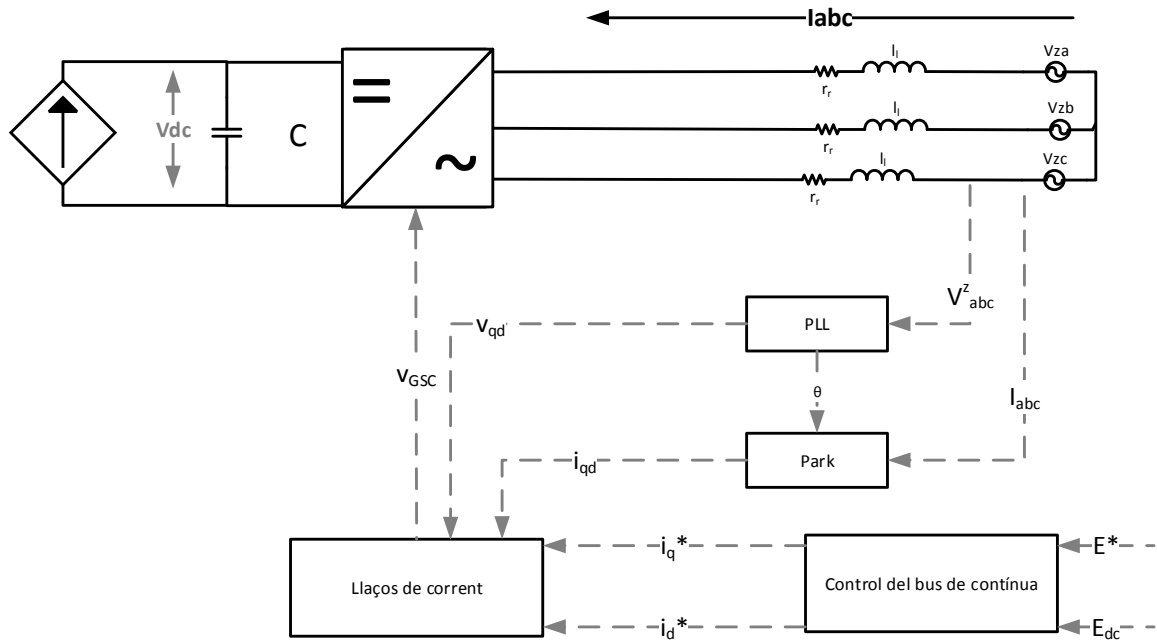


Figura 6.9 Esquema general del sistema de control GSC

6.2.2.1 Càlcul dels llaços de corrent

A continuació es mostra l'equació que defineix el sistema modelitzat al cantó de xarxa:

$$v_z^{abc} - v_l^{abc} = r_l \cdot i_l^{abc} + l_l \cdot \frac{d}{dt} i_l^{abc} \quad (6.21)$$

Si ara es transforma a la referència de Park, s'obté:

$$v_z^{qd} - v_l^{qd} = \begin{pmatrix} r_l & -l_l \omega_e \\ l_l \omega_e & r_l \end{pmatrix} i_l^{qd} + l_l \cdot \frac{d}{dt} i_l^{qd} \quad (6.22)$$

On:

ω_e és la velocitat angular elèctrica

f_e és la freqüència elèctrica de la xarxa

v_z^{qd} son les components de la tensió de la xarxa en referència de Park

v_l^{qd} son les components de la tensió del convertidor de la banda de xarxa (GSC) en la referència de Park

i_l^{qd} son les components de la intensitat del convertidor GSC en referència de Park



v_{zd} és la component directa del voltatge de la xara que sempre prendrà valor 0, de manera que al desenvolupar les equacions no es tindrà en compte

El que es vol calcular és el voltatge que haurà de donar el convertidor per assolir voltatge del bus de continua especificat per la consigna de tensió E .

$$\begin{cases} v_{lq} = v_{zq} + r_l \cdot i_{lq} - l_l \cdot w_e \cdot i_{ld} + l_l \cdot \frac{d}{dt} i_{lq} \\ v_{ld} = r_l \cdot i_{ld} + l_l \cdot w_e i_{lq} + l_l \cdot \frac{d}{dt} i_{ld} \end{cases} \quad (6.23)$$

Com que tornem a tenir paràmetres que depenen de w_e al igual que en el cas dels llaços de corrent del control del RSC, es modelitzen les següents equacions:

$$\begin{cases} v_{lq} = v_{zq} + \hat{v}_{lq} - l_l \cdot w_e \cdot i_{ld} \\ v_{ld} = \hat{v}_{ld} + l_l \cdot w_e \cdot i_{lq} \end{cases} \quad (6.24)$$

$$\begin{cases} \hat{v}_{lq} = r_l \cdot i_{lq} + l_l \cdot \frac{d}{dt} i_{lq} \\ \hat{v}_{ld} = r_l \cdot i_{ld} + l_l \cdot \frac{d}{dt} i_{ld} \end{cases} \quad (6.25)$$

Passant aquestes dues últimes equacions a Laplace:

$$\hat{v}_l^{qd} = r_l \cdot i_l^{qd} + l_l \cdot i_l^{qd} s \quad (6.26)$$

$$\hat{v}_l^{qd} = (r_l + l_l \cdot s) i_l^{qd} \quad (6.27)$$

$$i_l^{qd} = \frac{1}{(r_l + l_l s)} \hat{v}_l^{qd} \quad (6.28)$$

Per generar les tensions v_l es farà servir un controlador PI dissenyat fent servir el mètode IMC, ignorant les limitacions del convertidor a l'hora d'aplicar les tensions.

$$K_{ps} = \alpha l_l \quad (6.29)$$



$$K_{is} = \alpha r_l \quad (6.30)$$

$$i_l^{qd}(s) = \left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha}s + 1} \right) i_l^{qd*}(s) \quad (6.31)$$

On i_l^{qd*} son les consignes de corrent, i α es un paràmetre que permet escollir la constant de temps.

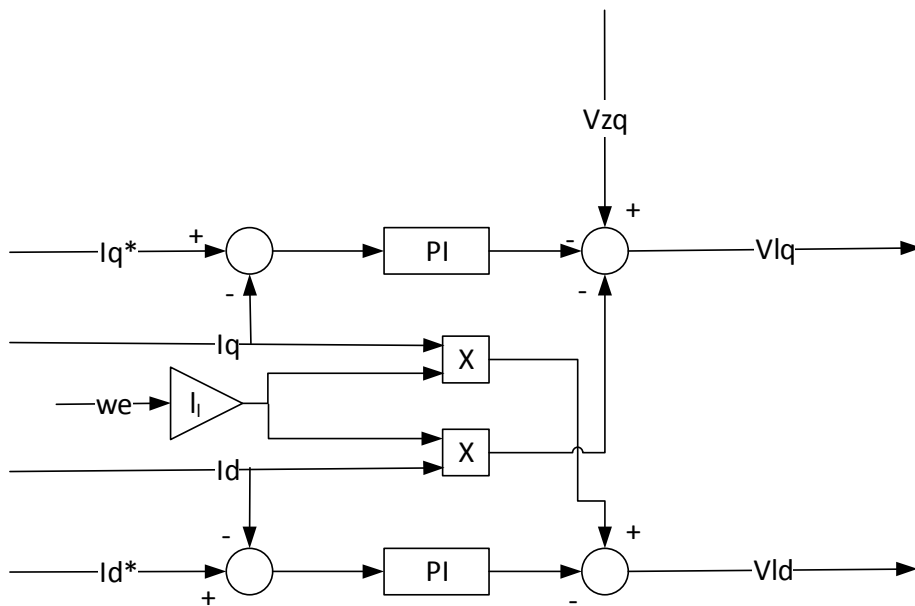


Figura 6.10 Controlador de corrent

6.2.2.2 Control de la tensió del bus de continua i càlcul les corrents

Per al control de tensió de bus, s'ha suposat que el convertidor de la xarxa té un rendiment del 100% i per tant la conversió es perfecta, tota la potència es transmet. A continuació es mostren les equacions que permeten calcular les consignes de corrent per a les fonts controlades del bus de contínua.

$$I_{dcx} = \frac{3}{2} \frac{v_{zq} i_{lq}}{E_{dc}} \quad (6.32)$$

$$I_{dcr} = \frac{3}{2} \frac{v_{rq} i_{rq} + v_{rd} i_{rd}}{E_{dc}} \quad (6.33)$$



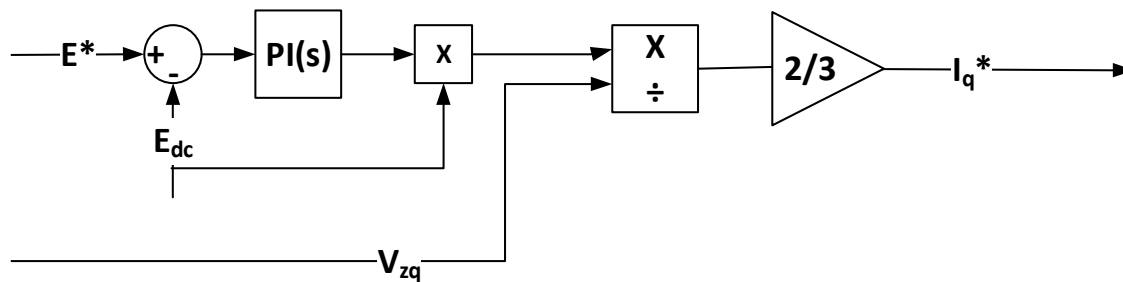


Figura 6.11 Controlador de la tensió de bus

Aleshores es pot modelitzar el sistema que dona com a resultat la consigna de corrent I_q^* de la següent manera:

On:

E^* és la consigna de voltatge del bus de continua

E_{dc} és la mesura del voltatge del bus de contínua

V_{zq} és el valor del voltatge de la xarxa

S'utilitza un controlador PI per aconseguir un error nul quan la entrada de I_{dcr} es constant.

$$Ki = \frac{2Cw_n^2}{3\frac{v_{zq}}{E}} \quad (6.34)$$

$$Kp = \frac{4Cw_n\xi}{3\frac{v_{zq}}{E}} \quad (6.35)$$

On:

C és la capacitat del condensador del bus de continua

W_n és la freqüència natural

ξ és el coeficient d'esmoreïment



7 Control durant un sot de tensió

7.1 Requeriments del sistema

En aquest projecte, s'ha estudiat els requeriments tècnics dels parcs eòlics actuals, en cas d'un sot de tensió, tot això apareix en la normativa [17]. Un sot de tensió pot aparèixer causat per un curtcircuit, en aquest projecte només s'ha tingut en compte una falla trifàsica, és a dir equilibrada.

Un sot de tensió és una disminució brusca de la tensió per sota de 0,85p.u. en la xarxa seguida del seu restabliment mitjançant els sistemes de protecció de la xarxa; tot això pot durar entre 10ms i 1min. Durant tot aquest fenomen el sistema s'ha de mantenir connectat a la xarxa.

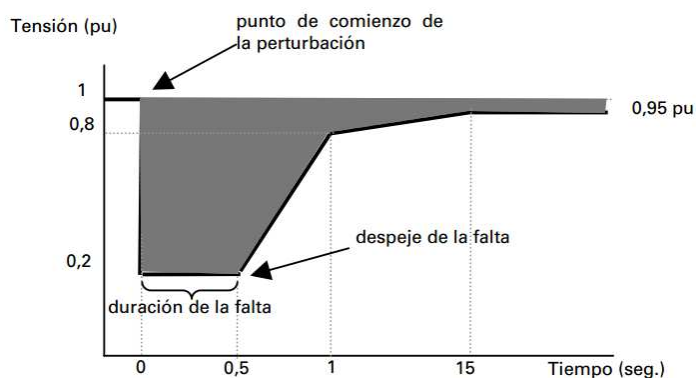


Figura 7.1 Sot de tensió on l'aerogenerador s'ha de mantenir connectat. Font [17]

Com s'especifica a la normativa [17] durant la falla trifàsica i la recuperació el sistema no pot consumir potència, i a més a més el sistema haurà d'aportar el màxim de intensitat (I_{max}) a la xarxa.

Per tal de controlar els efectes que té sobre el sistema aquest tipus de falles, s'ha modelitzat els següent sistema de protecció: El Chopper.



7.2 Sistema del chopper

7.2.1 Modelització del chopper

El sistema del chopper [18] serveix per a evitar que el voltatge del bus de contínua superi un valor màxim en cas de una falla com el sot de tensió; consisteix en una resistència i un interruptor en paral·lel amb el condensador del bus de continua. Aquest interruptor s'encendrà i apagarà amb PWM segons la tensió del bus de continua, o el volum de potència que es vulgui dissipar.

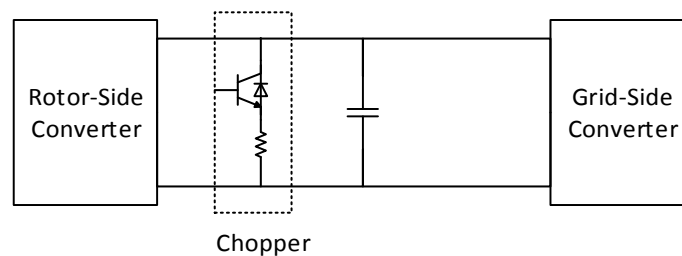


Figura 7.2 Chopper

Aquest tipus de senyals son més complicats de modelitzar, al igual que en els convertidors; i es per aquesta raó que també s'ha modelitzat com una font de corrent controlada.

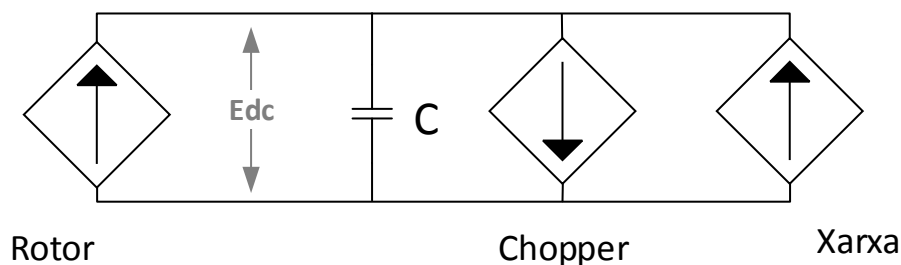


Figura 7.4 Modelització del chopper

7.2.2 Modelització del sistema de control del chopper

El sistema de control del chopper, calcula en funció del voltatge E_{dc} del bus de continua quina hauria de ser la corrent que passa a través de la seva resistència, per tal de consumir suficient potència com per evitar que el voltatge continuï augmentant.



Per fer això es defineixen un E_{\max} i un E_{\min} , els dos estaran per sobre de la consigna de tensió E^* del bus de continua, aleshores es busca variar la corrent linealment amb el voltatge que arriba. Per fer això es calcula el coeficient q , que prendrà valors únicament entre 0 i 1.

$$q = \frac{E_{dc} - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (7.1)$$

A partir del voltatge màxim i la potencia màxima que es pot permetre en el bus, es determina la resistència que tindria el chopper.

$$R_{chopper} = \frac{E_{\max}^2}{P_{\max}} \quad (7.2)$$

Un cop calculat això, només cal calcular la corrent que passa en cada moment a través del chopper.

$$I_{chopper} = q \frac{E_{dc}}{R_{chopper}} \quad (7.3)$$

7.3 Saturació dels corrents en el GSC

Com s'ha comentat en els requeriments tècnics per al sot de tensió cal que quan hi ha la falla trifàsica el sistema injecti a la xarxa el màxim corrent possible.

Segons V_{zq} es calcula la component I_{d1}^* a partir del següent gràfic, ja vist anteriorment de la normativa [17].



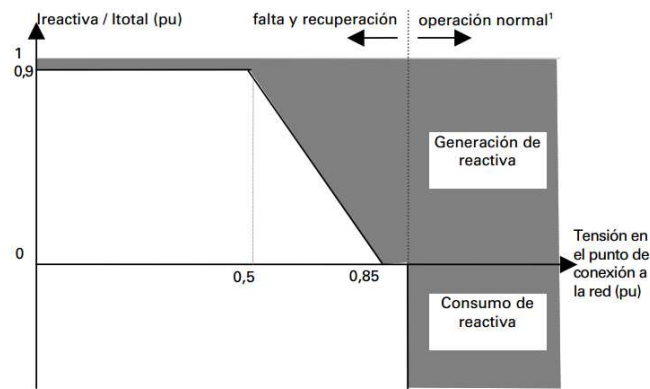


Figura 7.5 Intensitat reactiva que s'ha de subministrar a través del convertidor durant el sot de tensió. Font [17]

Per al càlcul de la corrent I_d s'ha utilitzat el següent sistema, aquesta component s'inicialitza amb un valor 0, i el sistema actua en cas d'haver un sot de tensió augmentant el valor d'aquesta component i saturant la component I_{dq} en cas de que sigui necessari.

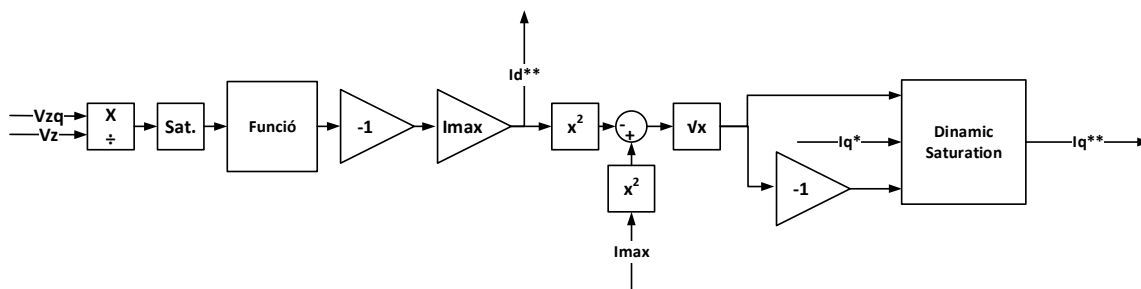


Figura 7.6 Model de saturació dels corrents de GSC

A partir d'aquí el que es fa es limitar el corrent I_{dq}^* tenint en compte la següent relació que limita el corrent màxim que pot assumir el sistema sense fer malbé els seus components:

$$I_{max} = \sqrt{I_q^2 + I_d^2} \quad (7.4)$$

En aquest projecte s'ha considerat $I_{max}=700A$.



8 Simulacions

S'ha modelitzat els sistemes anteriors amb Simulink per tal de simular un aerogenerador que es sotmet a diverses consignes. Per dur a terme aquestes simulacions s'ha assignat els següents a les variables del model:

Paràmetres de la Turbina			
Paràmetre	Variable	Valor	Unitats
Densitat de l'aire	ρ	1,23	[Kg/m ³]
Radi de les pales	R	38	[m]
Coeficient característic 1	c1	0,73	-
Coeficient característic 2	c2	151	-
Coeficient característic 3	c3	0,58	-
Coeficient característic 4	c4	0,002	-
Coeficient característic 5	c5	2,14	-
Coeficient característic 6	c6	13,2	-
Coeficient característic 7	c7	18,4	-
Coeficient característic 8	c8	-0,02	-
Coeficient característic 9	c9	-0,003	-
Velocitat nominal del vent	Vnom	12	[m/s]
Potència nominal	Ptnom	2	[MW]

Taula 8.1 Paràmetres de la turbina

Paràmetres de la Transmissió			
Paràmetre	Variable	Valor	Unitats
Moment d'inèrcia turbina	Jt	6E4	[Kg·m ²]
Relació de transmissió	N	100	-

Taula 8.2 Paràmetres de la transmissió

Paràmetres del generador			
Paràmetre	Variable	Valor	Unitats
Freqüència sincronisme nominal	fs	50	[Hz]
Voltatge nominal al estator	Vsnom	820	[V]
Potencia nominal	Pgnom	2	[MW]
Nombre de parells de pols	p	2	-
Resistència estator	Rs	6,70E-03	[Ω]
Resistència rotor	Rr	3,99E-02	[Ω]
Inductància estator	Ls	7,50E-03	[H]
Inductància rotor	Lr	5,20E-02	[H]
Inductància d'acoblament	M	1,94E-02	[H]

Taula 8.3 Paràmetres del generador



Paràmetres del convertidor			
Paràmetre	Variable	Valor	Unitats
Xarxa			
Resistència de la xarxa	r_l	0,5	[Ω]
Inductància de la xarxa	l_l	4,50E-03	[H]
Bus de contínua			
Consigna de voltatge	E^*	1400	[V]
Condensador	C	1,02E-03	[F]

Taula 8.4 Paràmetres del convertidor

Paràmetres del sistema de control del pitch			
Paràmetre	Variable	Valor	Unitats
Angle màxim del pitch	β_{\max}	30	[$^\circ$]
Angle mínim del pitch	β_{\min}	0	[$^\circ$]
Velocitat màxima del actuador	S_{\max}	8	[$^\circ/s$]
Velocitat mínima del actuador	S_{\min}	-8	[$^\circ/s$]
Constant de control del pitch	$K_{p\beta}$	1,00E-03	-
Constant de control del pitch	$K_{i\beta}$	1,00E-02	-
Constant de control del pitch	K_w	100	-
Constant de control del actuador	K_{act}	1	-

Taula 8.5 Paràmetres del sistema de control del pitch

Paràmetres del sistema de control del chopper			
Paràmetre	Variable	Valor	Unitats
Voltatge màxim permès	E_{\max}	1550	[V]
Voltatge d'activació del chopper	E_{\min}	1450	[V]
Potència màxima del bus de contínua	P_{\max}	2	[MW]
Resistència del chopper	$R_{chopper}$	1,2	[Ω]

Taula 8.6 Paràmetres del sistema de control del chopper

Aquests paràmetres s'han mantingut al llarg de totes les simulacions. Les consignes a controlar externes al generador son:

- La velocitat del vent
- La potència reactiva desitjada de l'estator, que en tots els casos es mantindrà a 0
- El voltatge de la xarxa en el cas del sot de tensió



8.1 Simulació per a un vent constant

S'ha realitzat una simulació per a velocitats de vent constants amb forma de graó, al principi el vent té un valor situat per sota de V_{nom} , i després per sobre per assegurar que la modelització del sistema del pitch és la correcta.

Tot i que aquesta simulació no s'ajusta a la realitat permet comprovar que el sistema funciona correctament.

En aquest model la velocitat nominal del vent es d'uns 11,7m/s aproximadament.

La velocitat inicial és de 9m/s i la final de 13m/s, tal com es mostra a la figura 8.1.

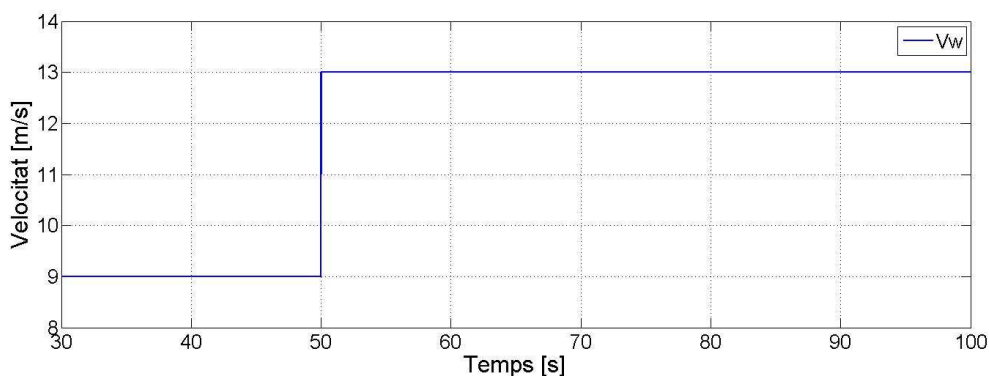
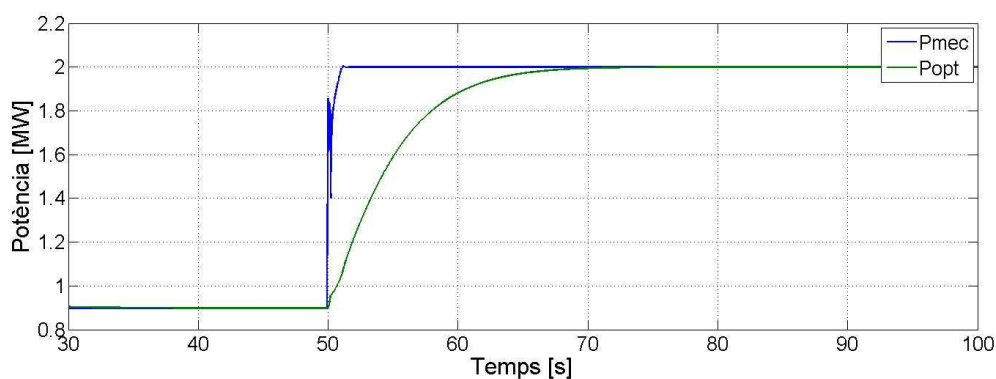


Figura 8.1 Velocitat constant inferior: V_w



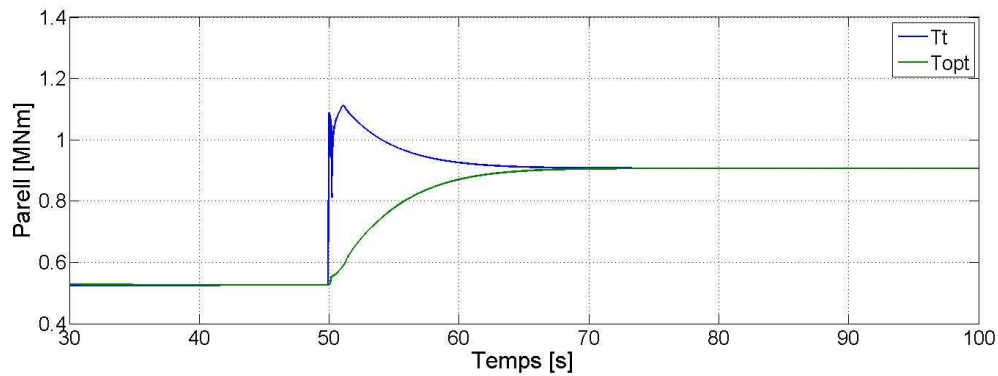


Figura 8.2 Velocitat constant inferior: P_{mec} , P_{opt} , T_t i T_{opt}

Com es pot comprovar al figura 8.2, la potència mecànica màxima que arriba a produir la turbina és de 2MW.

La potència mecànica de la turbina es manté constant degut al control del pitch, i al augmentar la velocitat de rotació de la turbina com es pot comprovar en la figura 8.3, el parell de la turbina disminueix.

El parell òptim té una relació directa amb la velocitat de rotació, com s'ha vist en l'apartat 6.1.2 la velocitat de rotació augmenta fent augmentar el parell òptim, i la multiplicació dels dos dona com a resultat la potència òptima de la turbina, que també augmenta.

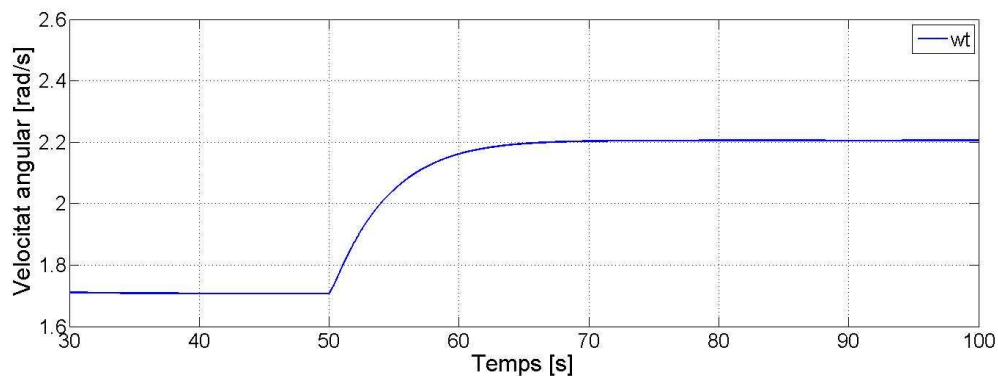


Figura 8.3 Velocitat de rotació de la turbina wt

La velocitat angular final de la turbina és de 2,2 rad/s que és correspon amb unes 21 rpm.



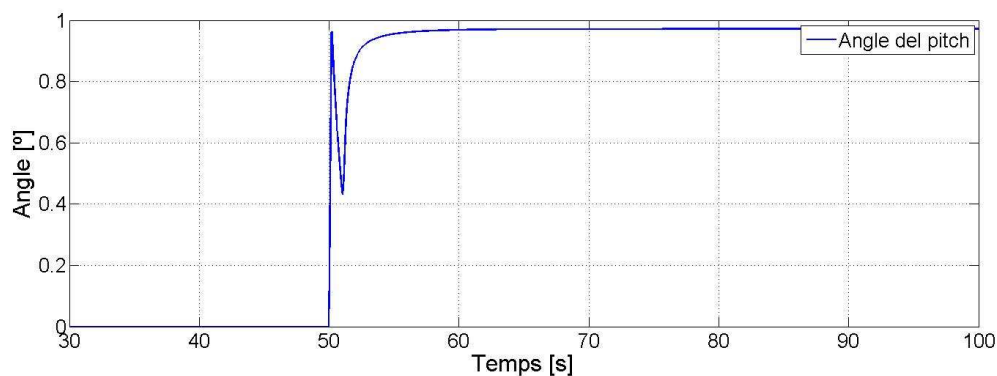


Figura 8.4 Velocitat constant inferior: Angle del pitch

L'angle del pitch que apareix en la figura 8.4 es manté a 0 fins el moment del graó en el qual augmenta per controlar la potència produïda per la turbina del aerogenerador.

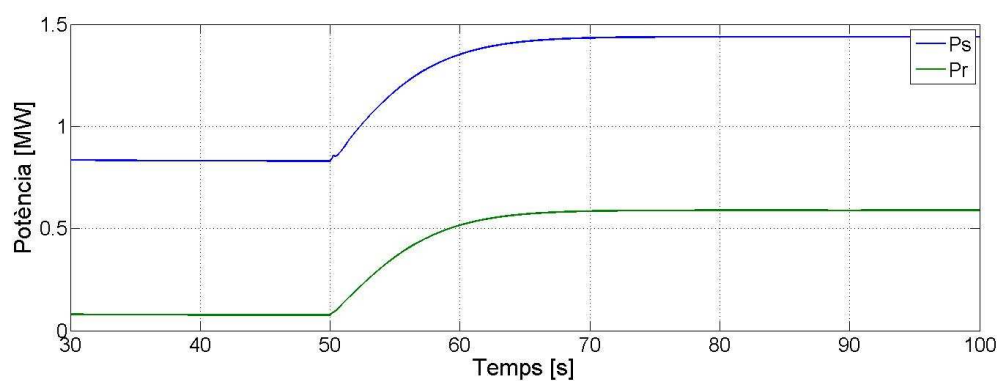


Figura 8.5 Velocitat constant inferior: Ps i Pr

Les potències actives del estator i del rotor augmenten amb el augment de la velocitat del vent però en cap moment arriben a sobrepassar el valor de 2MW.



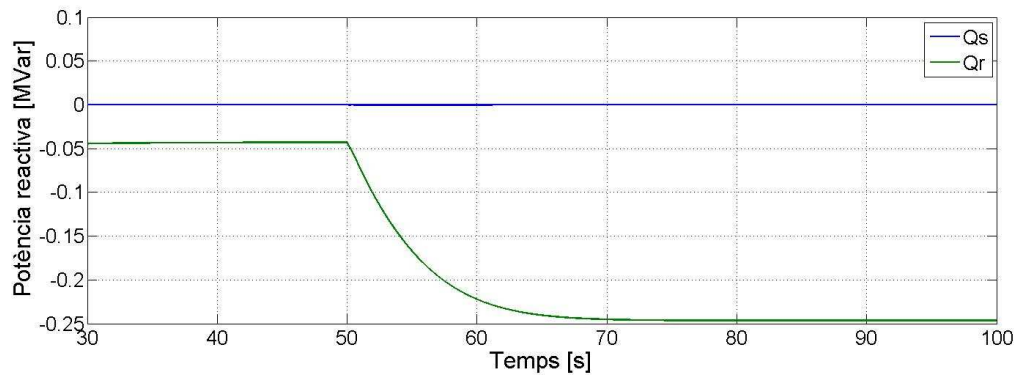


Figura 8.6 Velocitat constant inferior: Qs i Qr

La potència reactiva del estator en tot moment es manté en 0, tal com se li ha indicat al sistema. La potència reactiva generada per l'estator en canvi reacciona al graó amb un major transitori.

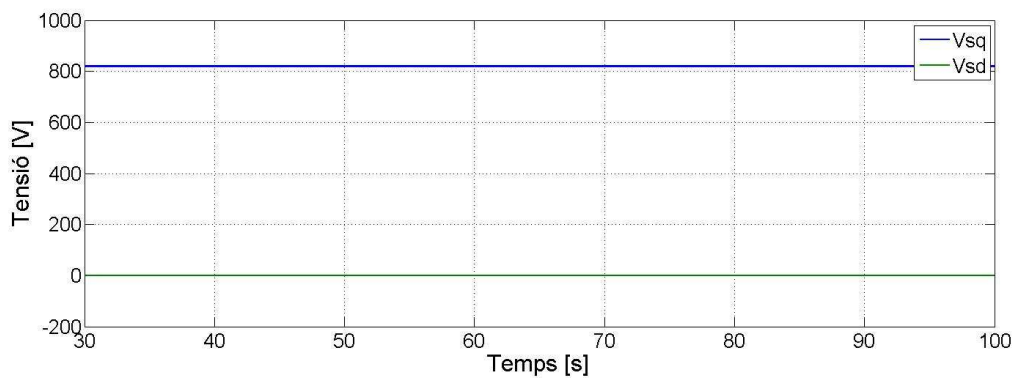


Figura 8.7 Velocitat constant inferior: Vs i Vr

Les tensions del estator depenen de la xarxa, i per tant romandran constants al llarg de totes les simulacions de vent.

8.2 Simulació per a un vent rampa

La rampa s'inicia al cap de 22 segons, i dura 4 segons amb un desnivell de 4m/s, la progressió del senyal es pot veure a la figura 8.8.



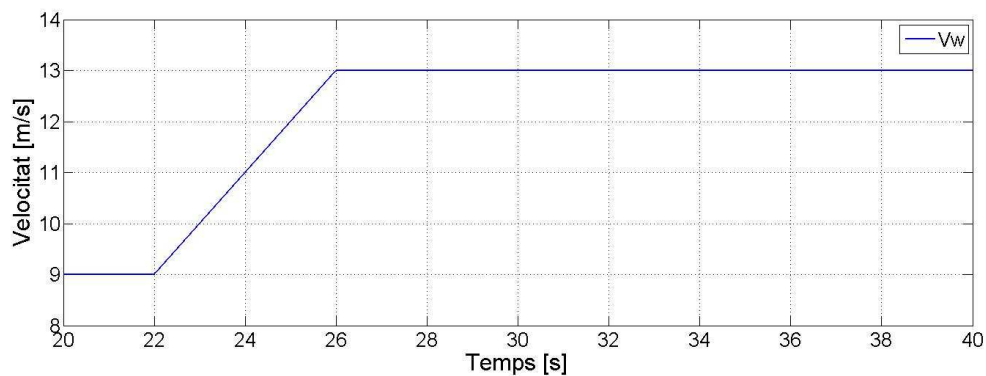


Figura 8.8 Component rampa: V_w

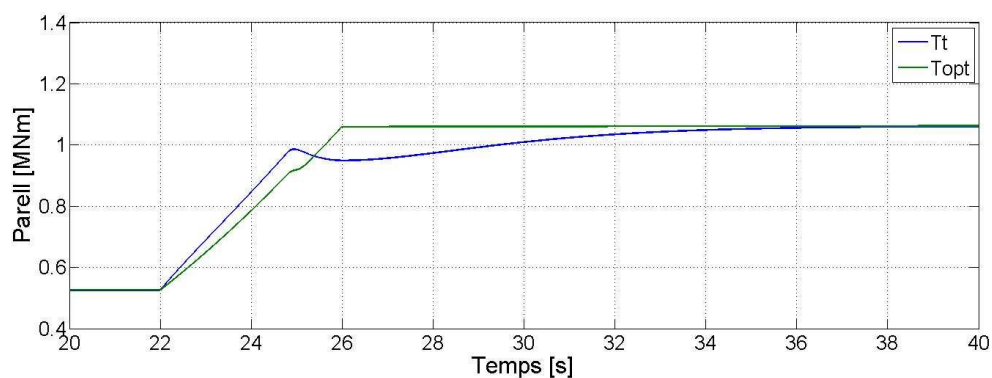


Figura 8.9 Component rampa: T_t , T_{opt}

Els parells augmenten durant la rampa i tendeixen a igualar-se.

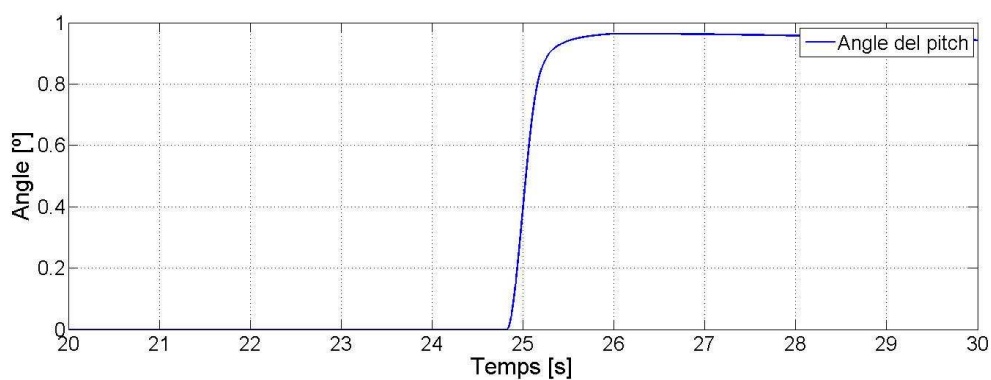


Figura 8.10 Component rampa: Angle del pitch



El velocitat del vent va augmentant, de la mateixa manera ho fan les potències i al final de la rampa s'activa el sistema de control del pitch per controlar aquest augment, això queda patent en la figura 8.10 on es pot veure la evolució del angle del pitch.

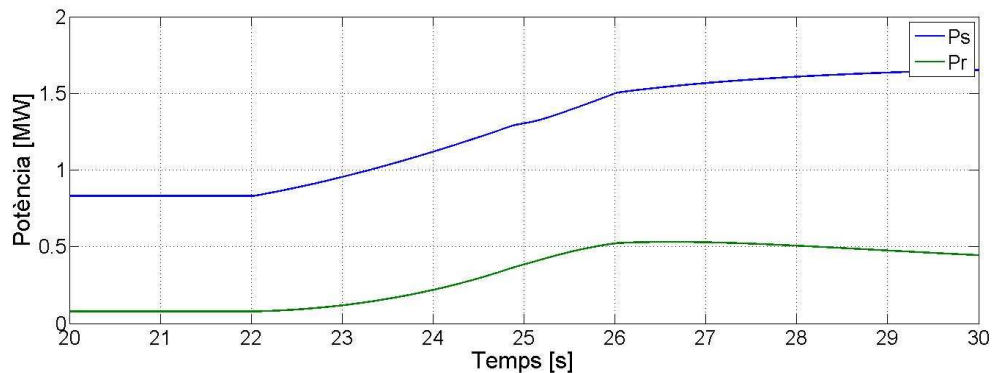


Figura 8.11 Component rampa: Ps i Pr

Es pot comprovar en la figura 8.11 com la potència activa va augmentant amb la rampa. La potència reactiva del estator és molt propera a 0 en tot moment.

8.3 Simulació per a vent ràfega

Durant aquesta simulació, el vent és constant fins al segon 22, i aleshores comença la ràfega que dura dos segons i mig amb una amplitud de 2m/s.

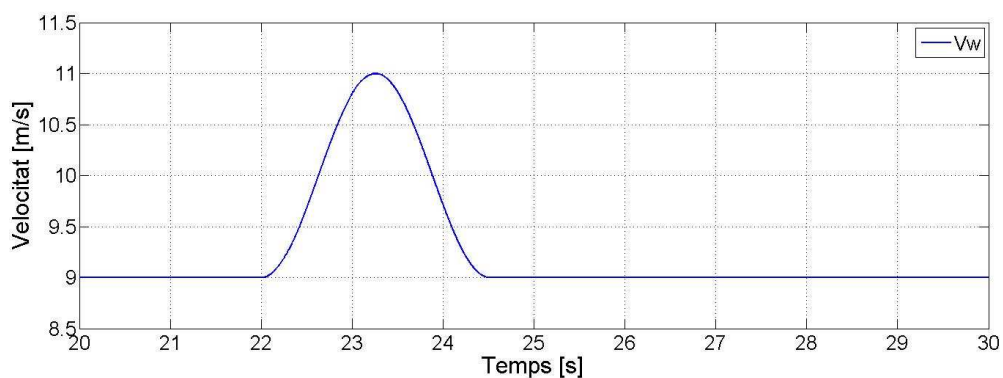


Figura 8.12 Component ràfega: Vw

Durant aquesta simulació el vent no ha estat mai per sobre de la velocitat nominal, i per tant no hi ha actuació del sistema del pitch. Es pot comprovar a la figura 8.13 que la potència mecànica



de la turbina s'adapta a la potència òptima calculada per el sistema de control d'alt nivell, i pren la mateixa forma que el senyal del vent (Figura 8.12).

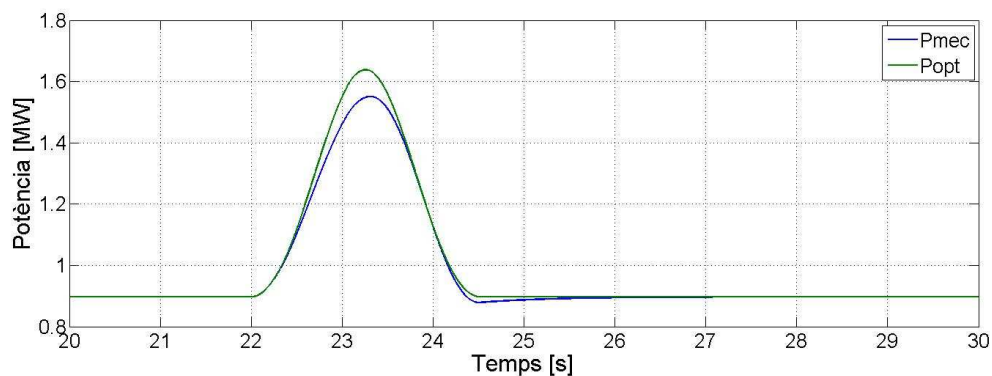


Figura 8.13 Component ràfega: P_{mec} i P_{opt}

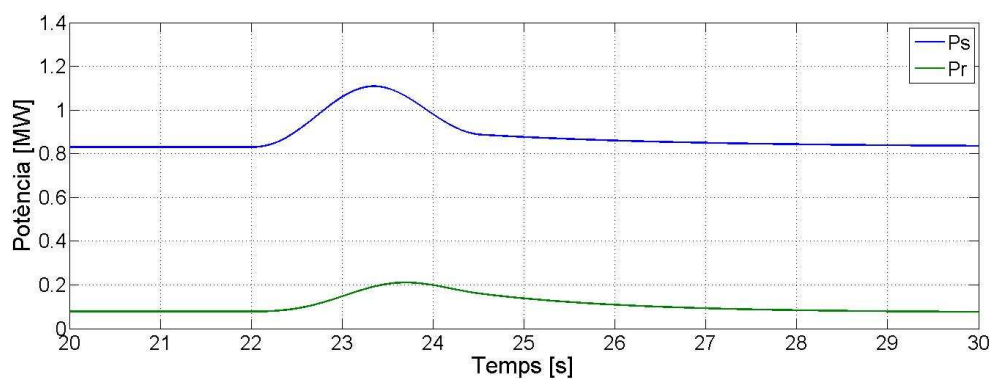
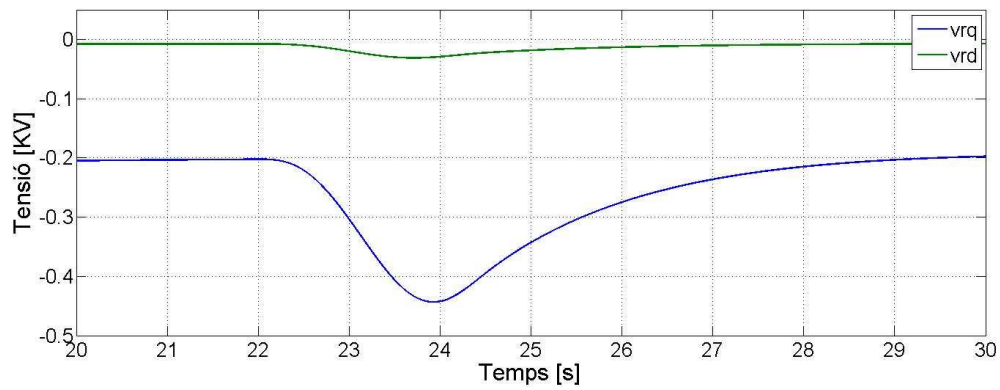


Figura 8.14 Component ràfega: P_s , P_r

Les potències actives també s'adapten a la forma de la consigna del vent, i la suma de les dues en cap moment supera la potència nominal.



Figura 8.15 Component ràfega: v_{rqd}

8.4 Simulació amb component de turbulència

Al llarg d'aquesta simulació, s'introdueix una sèrie de turbulència per tal de veure com es comporta el sistema patint petits canvis de velocitat del vent.

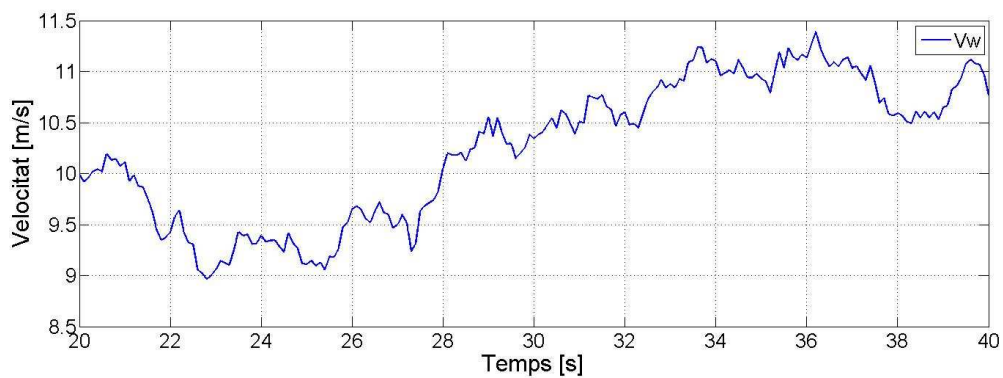
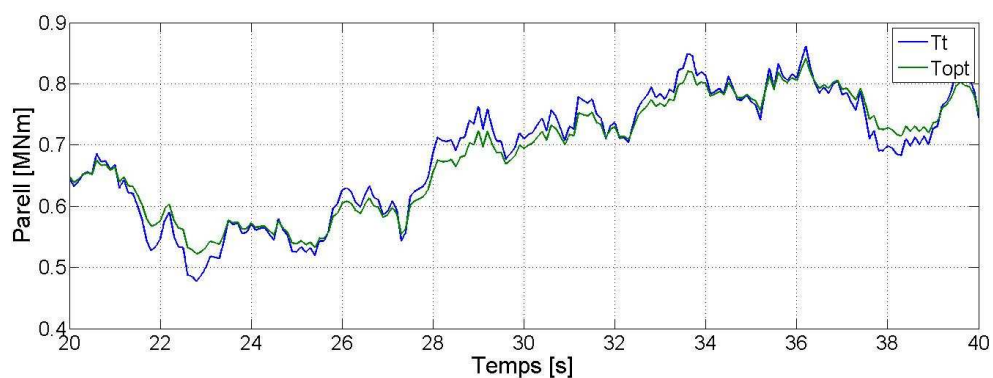
Figura 8.16 Component turbulència: V_w 



Figura 8.17 Component turbulència: Tt, Topt, Pmec i Popt

En les figures 8.17 es pot comprovar que el sistema s'adapta bé als canvis de la velocitat del vent i a les turbulències.

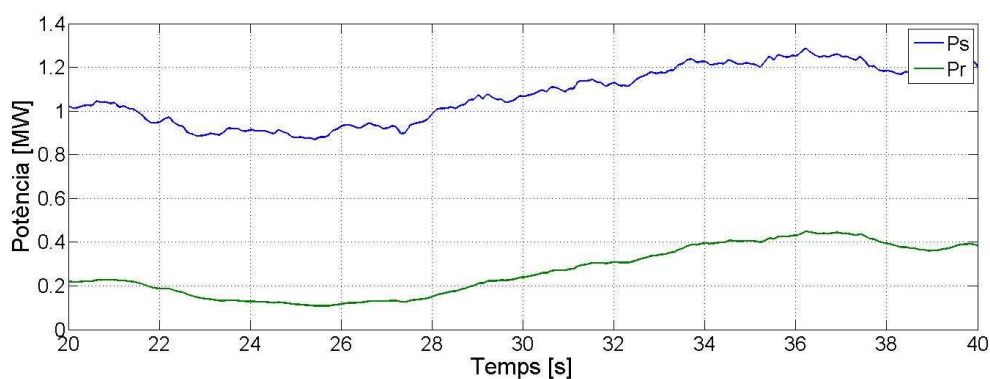


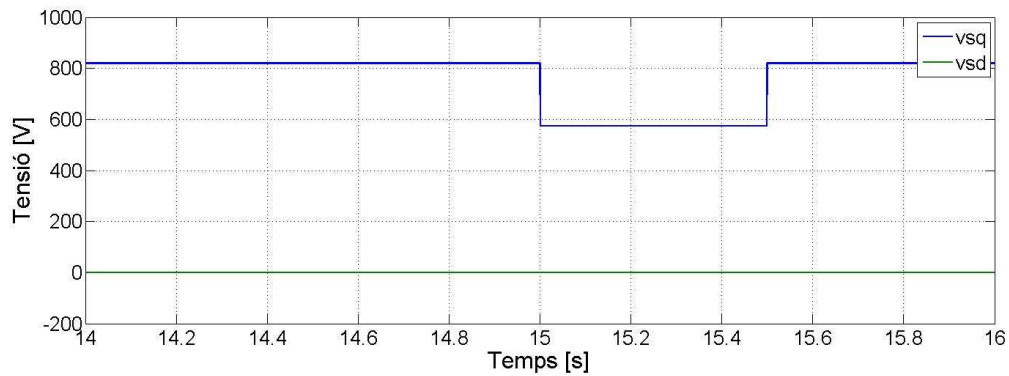
Figura 8.18 Component turbulència: Ps i Pr

En la figura 8.18 es pot comprovar com cada potència s'adapta al vent.

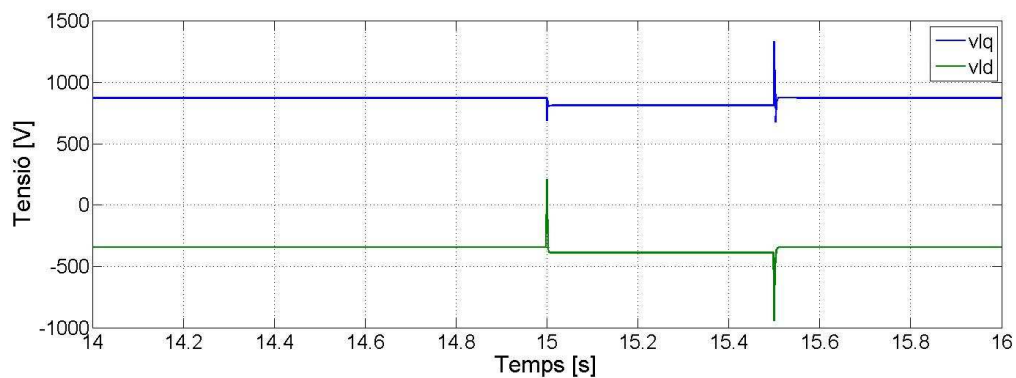
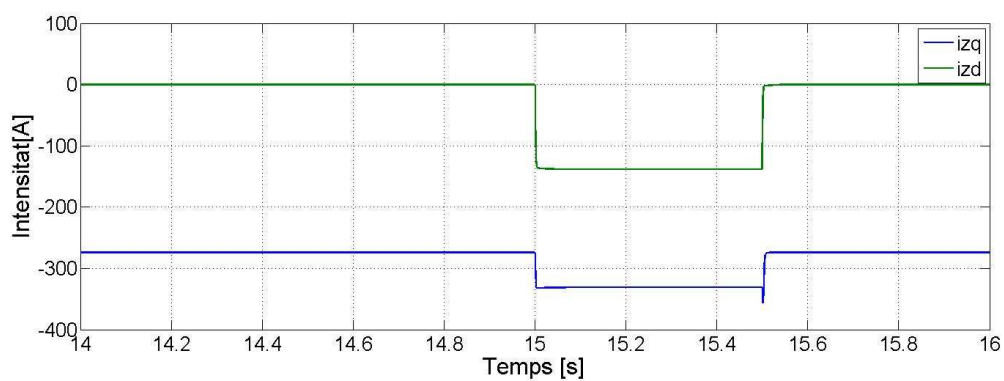
8.5 Simulació d'un sot de tensió a la xarxa

En aquest apartat es presenten els resultats de la simulació d'un sot de tensió del 70% a la xarxa, durant 0.5 segons. La consigna del vent és una constant a 13m/s, que està per sobre de la velocitat nominal.



Figura 8.19 Sot de tensió: v_{sqd}

En aquesta simulació el convertidor pren un paper molt important:

Figura 8.20 Sot de tensió: v_{lqd} Figura 8.21 Sot de tensió: i_{zqd}

Les intensitats i voltatges de la banda de xarxa tendeixen a un altre valor durant el sot, i quan aquest es recupera tornen als seus valors inicials.



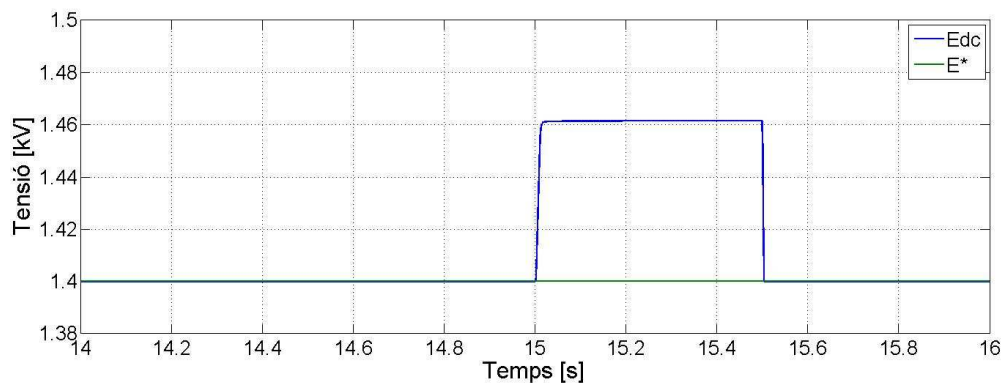


Figura 8.22 Sot de tensió: E_{dc}

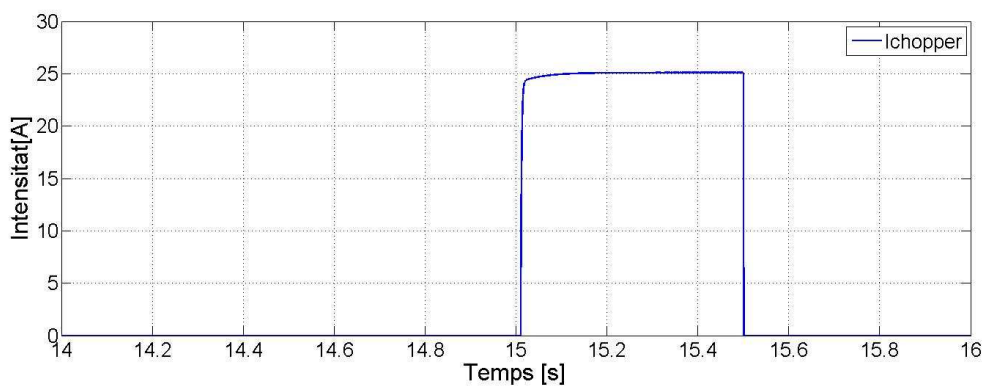


Figura 8.23 Sot de tensió: $I_{chopper}$

El bus de continua Figura 8.23 es troba inicialment a 1400V que és el valor consigna introduït en el sistema de control del GSC. Durant la falla trifàsica el voltatge augmenta i el chopper actua deixant passar intensitat per tal de limitar el voltatge i evitar danys en el sistema.



9 Impacte mediambiental

9.1 Impacte mediambiental d'un parc eòlic

Els aerogeneradors tot i ser un medi per aconseguir energia “neta” presenten alguns impactes negatius en el medi ambient al llarg de la seva vida [7] i [19], tot i que en general l'impacte ambiental es menor al produït per altres tipus de centrals d'energia.

9.1.1 Fabricació

En els aerogeneradors, les pales estan fabricades amb un material polimèric, polièster; amb un reforç de fibres de carboni o de vidre. La torre en canvi es de formigó, i la gòndola de fibra de vidre o acer. Els materials utilitzats provenen molts de mines en les quals les extraccions produeixen molta pols i s'utilitzen materials explosius. En el cas del polièster, hi ha tècniques d'extracció del petroli molt negatives per al medi ambient. En la majoria o tots els casos també s'han de dur a terme processos mitjançant els quals es tracta el material per poder crear mes tard els components.

La fabricació d'un aerogenerador implica generació de diòxid de carboni i soroll a les fabriques; després es transporta fins a l'emplaçament, on el fet d'utilitzar vaixells implica que restes de combustible poden ser abocades a les aigües.

9.1.2 Muntatge del parc i operació

Durant el muntatge, cal fer els assentaments de les torres al fons marí; això genera un impacte negatiu en la flora i fauna existents. En cas de que hi hagi alguna espècie protegida caldrà buscar un altre lloc per a la instal·lació del parc.

Durant la vida útil del aerogenerador que és aproximadament de 20 anys; el funcionament de l'aerogenerador genera soroll i un impacte estètic que en el cas de parcs eòlics *offshore* pot afectar a la fauna marina i a les aus (algunes d'elles xoquen contra les aspes), i a més a més els



aerogeneradors porten incorporades unes balises lluminoses per indicar la posició i evitar col·lisions amb vaixells i avions, aquestes, generen contaminació lumínica.

En general una central tèrmica de carbó (espanyola) genera al voltant d'unes 0.3 t CO₂/MWh. En el cas de l'aerogenerador de 2MW modelitzat suposant un factor de funcionament del 35% anual, s'obté una producció anual de 6132MWh, el que implica un estalvi aproximat de 1840 tones de CO₂ al any, o 210 Kg de CO₂/hora per cada generador d'aquest tipus que s'instal·li.

9.1.3 Desmantellament del parc

El desmantellament també crea un impacte negatiu al fons marí, en aixecar les estructures a més de tota la maquinaria pesada per dur-lo a terme, que genera soroll i diòxid de carboni, tot i que en molts casos no s'abandona l'emplaçament sinó que el que es fa es substituir els aerogenerador per continuar produint; de manera que es possible que aquest tipus d'impacte en el fons marí es minimitzi.

I per últim cal tenir en compte la contaminació que produeix tot el transport de matèries primeres, materials, components fins l'emplaçament i el desmantellament, és a dir diòxid de carboni y soroll.

Tot i això, cal dir que l'energia eòlica es una font menys contaminant que qualsevol de combustibles fòssils, les quals generen molt diòxid de carboni durant la generació d'energia; i a més a més és renovable.

9.2 Impacte mediambiental del projecte teòric

Al llarg d'aquest projecte s'ha utilitzat un ordinador amb un consum aproximat de 0.11KWh/h i s'ha trigat en dur-lo a terme aproximadament unes 580h que es consideraran hores en les quals el ordinador estava encès, és a dir un factor d'utilització del 100%. Tot això dona com a resultat un consum de 63.8KWh, tenint en compte que per cada KWh consumit es generen 0.3Kg de CO₂, per tal de dur a terme el projecte teòric s'han emès 19.14 Kg de CO₂ a l'atmosfera.



10 Estudi econòmic

Al llarg d'aquest projecte s'ha realitzat un model teòric d'una turbina de vent de velocitat variable; és a dir que no s'han hagut de tenir en compte tots els costos necessaris per crear un parc eòlic *offshore* (marítim).

Per tal de conèixer el pressupost d'aquest projecte cal distingir entre les eines o material i la mà d'obra. A continuació es mostra el pressupost destinat al material:

Concepte	Preu unitari	Unitats	Total
Ordinador portàtil	800,00 €	1	800,00 €
ratolí	20,00 €	1	20,00 €
Software (<i>Matlab</i> 2013)	2.100,00 €	1	2.100,00 €
Bolígrafs	0,50 €	3	1,50 €
Llibretes	2,00 €	2	4,00 €
Total			2.925,50 €

Taula 10.1 Costos del material emprat

La mà d'obra per a fer el estudi ha costat el següent:

Concepte	Preu per hora	Hores	Total
Modelització	35,00 €	300	10.500,00 €
Simulació	35,00 €	150	5.250,00 €
Redacció	35,00 €	130	4.550,00 €
Total			20.300,00 €

Taula 10.2 Costos de la mà d'obra

La suma de tot el conjunt afegint-hi el IVA és la següent:

Concepte	Total
Material	2.925,50 €
Recursos humans	20.300,00 €
Total sense IVA	23.225,50 €
IVA (21%)	4.877,36 €
Total	28.102,86 €

Taula 10.3 Cost total del projecte



Conclusions

L'objectiu d'aquest projecte ha estat l'estudi del comportament d'un aerogenerador de tres aspes per a parcs eòlics *offshore* amb un generador DFIG. Al llarg del projecte s'han analitzat les equacions que descriuen el seu comportament així com el seus sistemes de control.

El convertidor back-to-back, s'ha vist que permet controlar el voltatge del rotor de manera que el generador pot adaptar-se a les diferents velocitats del vent. El seu sistema de control es un aspecte molt interessant a nivell d'estudi.

El sistema de control d'alt nivell, també es un aspecte important d'aquest projecte ja que permet optimitzar i limitar la potència d'acord amb el senyal de vent. Això ha donat peu a les primeres simulacions on s'ha pogut comprovar el bon funcionament i la viabilitat del sistema.

Finalment s'ha dut a terme una simulació amb un sot de tensió a la xarxa segons les especificacions de la normativa, on ha pres més importància el control del convertidor que el d'alt nivell o del voltatge del rotor.

Un parc eòlic produeix alguns impactes negatius en el medi ambient, però és cert que aquest impacte es molt menor que el que produeixen altres tipus de centrals elèctriques com podrien ser les de combustibles fòssils. A més a més durant la seva vida útil i durant el desmantellament generen menys residus que les altres. El manteniment es més senzill que el d'altres energies netes com podria ser la solar; on les plaques cal netejar-les per tal de no veure el seu rendiment disminuït.



Agraïments

El meu més sincer agraïment a l'Agustí Egea i a l'Oriol Gomis per el seu suport, i la seva predisposició a ajudar-me durant tot el desenvolupament d'aquest projecte. També els hi vull agrair la seva paciència alhora de resoldre els meus dubtes, i els seus consells sense els quals aquest projecte no hagués tirat endavant.

També els vull agrair a tots els companys del departament, sobretot a l'Alexis Sorli i a en Muhammad Raza el seu suport i ajut desinteressat en els moments en els que el projecte semblava no avançar.

Finalment vull agrair-li a la meva família el seu suport incondicional, i el fet d'haver cregut en mi sempre.



Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] MICHAEL A. SNYDER, Development of Simplified Models of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG), Göteborg, Sweden 2012.
- [2] ROGER RIFÀ ESPUÑA, Modelització i control d'un aerogenerador direct-drive amb GSIP, 2014.
- [3] CAMILLE HAMON, Doubly-fed induction generator modeling and control in digilent powerfactory, 2010.
- [4] THOMAS ACKERMAN; Wind power in power systems. West Sussex: 2005, p.555-602
- [5] THE DANISH ENERGY AGENCY; Recommendation for technical approval of offshore wind turbines. 2001.
- [6] F. M. GONZÁLEZ-LONGATT, O. AMAYA, M. COOZ, L. DURAN, C. PERAZA, F. J. ARTEAGA, C. VILLANUEVA; Modelización y simulación de la velocidad de viento por una formulacion estocástica, REVISTA INGENIERÍA UC. Vol. 14, No 3, 7-15, 2007
- [7] MARTIN KALTSHMITT, WOLFGANG STREICHER, ANDREAS WIESE, Renewable Energy. Berlin: 2007, p. 295-343
- [8] CARLOS OURO DORAL, Modelado, simulación y control de un aerogenerador de velocidad variable, 2013
- [9] S. ROMPHOCHAI, P. KUMKRATUG. Modeling and simulation DFIG based on windenergy conversion system in MATLAB/SIMULINK. Conf. on Advances in Electronics and Electrical Engineering, 2013.



- [10] L. F. GARCÍA VERDE, S. NÁJERA CANAL, J. RICO AZAGRA, M. GIL-MARTÍNEZ; Modeling and control of a doubly-fed induction generator in a wind turbine, 17th International congress on project management and engineering, Logroño 2013.
- [11] ADRIÀ JUNYENT-FERRÉ. Modelització i control d'un Sistema de generació elèctrica de turbina de vent. 2007.
- [12] JONATHAN FOURNIER, Modeling control and experimental validation of a DFIG-based wind turbine test bench, Barcelona 2013.
- [13] D. AOUZELLAG, K. GHEDAMSI, E. M. BERKOUK; Power control of a variable speed wind turbine driving an DFIG; Algeria
- [14] AGUSTÍ EGEA-ALVAREZ, ADRIÀ JUNYENT-FERRÉ, ORIOL GOMIS-BELLMUNT. Active and Reactive Power Control of Grid Connected Distributed Generation Systems. Springer Series in Green Energy and Technology, 2012.
- [15] D. OROÑO, M. SAPIO, G. TERZANO, A. VÁZQUEZ; Modelo didàctico en Simulink de un generador eólico basado en un DFIG; Montevideo, 2010.
- [16] DJAMILA REKIOUA, Wind power electric systems. London: 2014, p133-160
- [17] MINISTERIO DE INDUSTRIA I COMERCIO (BOE núm. 254). Procedimiento de Operación 12.3 Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas
- [18] C. FELTES, H. WREDE, F. W. KOCH, I. ERLICH; Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission; IEEE transactions on power systems, VOL. 24. No. 3. August 2009.
- [19] M. ESCUDERO LÓPEZ; Manual de energía eólica; Barcelona 2008.



Apèndix A - Transformada de Park

Les transformades de Park i de Clarke s'utilitzen sobretot alhora de treballar amb màquines síncrones d'imants permanents i en màquines asíncrones.

A.1 Transformada de Clarke

La transformada de Clarke s'utilitza per passar d'un senyal trifàsic a un bifàsic tal com es pot veure a la figura A.2. D'aquesta manera es redueixen les variables de tres a dues simplificant el sistema.

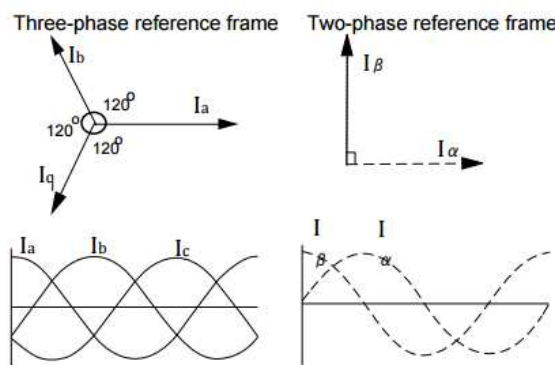


Figura A.0.1 Senyal *abc* i senyal de Clarke

$$T_{abc \rightarrow \alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$x^{\alpha\beta} = T_{abc \rightarrow \alpha\beta} \cdot x^{abc} \quad (\text{A.2})$$

On:

$T_{abc \rightarrow \alpha\beta}$ és la matriu que permet transformar de la referència *abc* a la de Clarke

$x^{\alpha\beta}$ és el vector de components en la referència de Clarke

x^{abc} és el vector de components en la referència *abc*



La inversa de la transformada de Clarke es pot escriure de la següent manera:

$$T_{\alpha\beta \rightarrow abc} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$x^{abc} = T_{abc \rightarrow \alpha\beta} \cdot x^{\alpha\beta} \quad (\text{A.4})$$

On:

$T_{\alpha\beta \rightarrow abc}$ és la matriu que permet transformar de la referència de Clarke a la abc

$x^{\alpha\beta}$ és el vector de components en la referència de Clarke

x^{abc} és el vector de components en la referència abc

A.2 Transformada de Park

La transformada de Park permet transformar un senyal trifàsic en dos senyals constants, això simplifica encara més la manera de treballar.

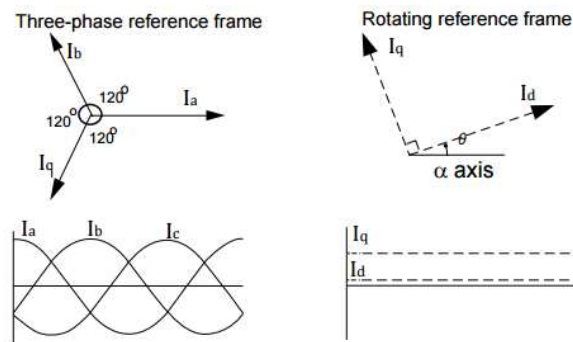


Figura A.0.2 Senyal abc i senyal de Park

$$T_{abc \rightarrow qd} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

$$x^{qd} = T_{abc \rightarrow \alpha\beta} \cdot x^{abc}$$



On:

$T_{abc \rightarrow qd}$ és la matriu que permet transformar de la referència abc a la de Park

x^{qd} és el vector de components en la referència de Park

x^{abc} és el vector de components en la referència abc

La inversa de la transformada de Clarke es pot escriure de la següent manera:

$$T_{qd \rightarrow abc} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix}$$

$$x^{abc} = T_{abc \rightarrow qd} \cdot x^{qd}$$

On:

$T_{qd \rightarrow abc}$ és la matriu que permet transformar de la referència de Park a la abc

x^{qd} és el vector de components en la referència de Park

x^{abc} és el vector de components en la referència abc

